

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mihovil Ratajec

Zagreb, godina 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. Dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Mihovil Ratajec

Zagreb, godina 2015.

Izjava:

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno, služeći se stečenim znanjima i stručnom literaturom koja je navedena u sadržaju rada.

Zahvala:

Ovim putem bih se posebno zahvalio mentoru docentu Ivici Garašiću na pomoći, savjetima i vremenu uloženom tijekom pisanja mog diplomskog rada.

Laborantima zavarivačima Krešimiru Sukobljeviću, Mati Šokičiću i Zdenku Batiniću s Katedre za zavarene konstrukcije na izvođenju pokusa eksperimentalnog dijela diplomskog rada.

Tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pomoći i smjernicama tijekom izrade završne faze eksperimentalnog dijela diplomskog rada.

Roditeljima, sestri i djevojci se posebno zahvaljujem na strpljenju i razumijevanju te pomoći u svakom trenutku tijekom studija.

Mihovil Ratajec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MIHOVIL RATAJEC**

Mat. br.: 0035172104

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **SISTEMATIZACIJA ISPITNIH METODA ZA ODREĐIVANJE ZAVARLJIVOSTI**

Naslov rada na engleskom jeziku: **SISTEMATIZATION OF TESTING PROCEDURES FOR DETERMINATION OF WELDABILITY**

Opis zadatka:


Na temelju dostupne literature opisati moderan pristup određivanju zavarljivosti i to uz primjenu analitičkih i eksperimentalnih metoda. Razložiti sve kriterije na osnovu kojih se provodi ispitivanje zavarljivosti i to prvenstveno za čelike te aluminijske, bakrene i niklene legure. Navesti specifične aspekte zavarljivosti za pojedine grupe osnovnih materijala. Opisati standardizirane metode ispitivanja zavarljivosti te načiniti prikladnu klasifikaciju obzirom na način provođenja i spomenute kriterije.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je za odgovarajući osnovni materijal provesti ispitivanje zavarljivosti prema barem dvije standardizirane metode za odabrani kriterij. Ispitivanje provesti na više razina sa stanovišta tehnologije zavarivanja (npr. unos topline, različiti dodatni materijali, temperatura predgrijavanja). U konačnici je potrebno načiniti komparativnu analizu za primijenjene metode obzirom na dobivene rezultate i donijeti zaključke o mogućim unaprijedjenjima eksperimentalnih procedura.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Ivica Garašić


Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predvideni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. SUSTAV ODREĐIVANJA ZAVARLJIVOSTI.....	4
2.1. Metalurška zavarljivost	5
2.2. Konstrukcijska zavarljivost.....	6
2.3. Operativna zavarljivost	7
2.4. Metalurška zavarljivost – svojstva kemijskog sastava.....	8
2.4.1. Sklonost prema hladnim pukotinama.....	8
2.4.2. Sklonost prema starenju materijala	22
2.4.3. Sklonost prema toplim pukotinama	26
2.4.4. Temperatura tališta.....	39
2.4.5. Temperatura vrelišta	41
2.5. Metalurška zavarljivost – metalurška svojstva	42
2.5.1. Mikro i makro segregacije	42
2.5.2. Uključci nečistoća	45
2.5.3. Anizotropnost mikrostrukture	50
2.5.4. Veličina kristalnih zrna	51
3. EKSPERIMENT.....	56
3.1. Uvod u eksperimentalni dio	56
3.2. Plan eksperimenta	57
3.3. Odabir materijala.....	58
3.3.1. Osnovni materijal	58
3.3.2. Dodatni materijal.....	58
3.4. Plan pokusa	61
3.5. Priprema ispitnih uzoraka	62
3.6. Varesitrait metoda ispitivanja	62
3.7. Ispitivanje na pukotine u samoukrućujućem T-spoju	69
3.8. Nerazorna ispitivanja	79
3.9. Rezultati ispitivanja – Vareststraint metoda	85
3.9.1. Vareststraint varijanta 1	85
3.9.2. Vareststraint varijanta 2	88
3.9.3. Vareststraint varijanta 3	92
3.10. Rezultati ispitivanja – Samoukrućeni T-spoj metoda	96
3.10.1. Samoukrućeni T-spoj varijanta 1	96
3.10.2. Samoukrućeni T-spoj varijanta 2	100
3.10.3. Samoukrućeni T-spoj varijanta 3	103
3.11. Ukupni rezultati ispitivanja.....	106
4. ZAKLJUČAK.....	109
5. LITERATURA	111

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz teoretskog sustava za određivanje zavarljivosti [1]	3
Slika 2.	Shematski prikaz ključnih aspekata zavarljivosti prema normi ISO/TR 581 [2]....	4
Slika 3.	Propagacija hladne pukotine [8]	8
Slika 4.	Shematski prikaz uzroka i rješenja nastanka hladnih pukotine [9]	9
Slika 5.	Shematski prikaz općih utjecajnih faktora na nastanak hladnih pukotina [8]	10
Slika 6.	Koncentracija naprezanja koje izaziva lokalna distorzija kristalne rešetke [10]...	11
Slika 7.	Raspodjela naprezanja izazvanih lokalnom distorzijom kristalne rešetke [10]....	11
Slika 8.	Spajanje monoatomnog vodika u dvo atomni oblik unutar pora u metalu [11]	12
Slika 9.	Vrste zamki za vodik koje nastaju kao distorzija kristalne rešetke [8]	13
Slika 10.	Topivost vodika pri normalnom atmosferskom tlaku [12].....	15
Slika 11.	Dijagrami ponašanja apsorpcije vodika [8]	17
Slika 12.	Usporedni dijagrami za praćenje topivosti vodika [8]	18
Slika 13.	Utjecaj unosa topline na strukturu zavarenog spoja za ugljični čelik [12].....	24
Slika 14.	Dijagrami udarne žilavosti, čvrstoće i istezljivost [12]	25
Slika 15.	Geometrije zavarenog spoja sklone toplim pukotinama [36].....	29
Slika 16.	Makro izbrusci sa vidljivim toplim pukotinama [35].....	29
Slika 17.	Dijagram utjecaja geometrije i udjela ugljika na stvaranje toplih pukotina [12] ..	30
Slika 18.	Shematski prikaz nastanka solidifikacijske pukotine [35]	31
Slika 19.	Shematski prikaz ukruta [37]	32
Slika 20.	Dijagram istezljivosti i vlačne čvrstoće u ovisnosti o temperaturi [37]	33
Slika 21.	Utjecajni parametara na uzroke i rješenja nastanka toplih pukotina [37]	34
Slika 22.	Likvacijske pukotine izazvane varestraint ispitivanjem [35]	35
Slika 23.	Ilustrativni prikaz interkristalnog djelovanja toplih pukotina [37]	36
Slika 24.	Prikaz raspodjele naprezanja i njihov utjecaj na stvaranje toplih pukotina [37] ...	36
Slika 25.	Desno, povoljnija geometrija zavarenog spoja [36].....	39
Slika 26.	Nastank likvacijskih pukotina kod višeslojnog zavarivanja [35].....	37
Slika 27.	Shematski prikaz utjecajnih parametara na likvacijske tople pukotin [37]	38
Slika 28.	Kromovi oksida na površini nehrđajućeg čelika [38].....	40
Slika 29.	Najčešće greške zavarenog spoja na aluminijskim materijalima [12].....	41
Slika 30.	Makro prikaz interkristalnih uključaka u metalu zavara [5]	43
Slika 31.	Grupa slika prikazuje različite mehanizme rasta kristalnih zrna [34]	44
Slika 32.	Makrosegregacije nastale uključcima zaštitne obloge [39].....	44
Slika 33.	Shematski prikaz lokacija nastanka uključaka troske u zavarenom spoju [5].....	45
Slika 34.	Uključak troske u zavarenom spoju [5].....	46
Slika 35.	Radiogrami sa prikazima uključaka volframa [5]	47
Slika 36.	Prikaz uključka aluminijevog oksida [5]	49
Slika 37.	Dijagram ovisnosti čvrstoće o naprezanjima - anizotropnosti materijala [48]	50
Slika 38.	Raspodjela čvrstoće materijala u ovisnosti o izotropnosti materijala [49].....	50
Slika 39.	Ilustrativni prikaz odnosa kristalnih zrna i gustoće dislokacija [49].....	51
Slika 40.	Nastank likvacijskih pukotina kod višeslojnog zavarivanja [35].....	52
Slika 41.	Etalon za mjerenje veličine kristalnih zrna [51].....	53
Slika 42.	Shematski prikaz plana pokusa [1].....	57
Slika 43.	Shematski prikaz izvođenja varestraint metode [67]	63
Slika 44.	Ispitni uzorak pripremljen za varestraint metodu [1]	64
Slika 45.	Uređaji korišteni tijekom izvođenja zavarivanja i ispitivanja.	65
Slika 46.	Prikaz ispitnog uzorka za T-spoj metodu [67]	70
Slika 47.	Grupa slika: pripreme za zavarivanje ukrutnih zavara [67]	72

Slika 48.	Pripremljene ukrute prije zavarivanja [1].....	73
Slika 49.	Zavarene ukrute, pripremljene za daljnje provođenje ispitivanja [1].....	73
Slika 50.	Prikaz u nacrtu i bokocrtu izgled ispitnih zavara i kontrolnih točaka [67]	75
Slika 51.	Uređaj za mehanizirano vođenje procesa zavarivanja Bugo [1]	77
Slika 52.	Uzorak za ispitivanje ponašanja taline pri kombinacijama parametara [1].....	77
Slika 53.	Uređaj za savijanje za varestraint metodu ispitivanja toplih pukotina [1]	77
Slika 54.	Ispitni uzorci nakon procesa zavarivanja [1].....	78
Slika 55.	Shematski prikaz slijeda izvršavanja penetrantske kontrole [76]	80
Slika 56.	Ispitni uzorci s nanešenim penetrirajućim slojem [1]	81
Slika 57.	Ispitni zavar načinjen na površini uzorka, varestraint varijanta 1 [1]	86
Slika 58.	Nanošeni sloj razvijača na površini uzorka, varestraint varijanta 1 [1]	86
Slika 59.	Uvećani prikaz mjesta nastanka pukotina, varestraint varijanta 1 [1].....	86
Slika 60.	Makro izbrusak, varestraint varijanta 1 [1]	87
Slika 61.	Dijagrami prikaza količine i dužine pukotina, varestraint varijanta 1 [1].....	87
Slika 62.	Ispitni zavar načinjen na površini uzorka, varestraint varijanta 2 [1]	89
Slika 63.	Nanešeni sloj razvijača na površini uzorka, varestraint varijanta 2 [1].....	89
Slika 64.	Uvećani prikaz mjesta nastanka pukotina, varestraint varijanta 2 [1].....	90
Slika 65.	Makro izbrusak, varestraint varijanta 2 [1]	90
Slika 66.	Dijagrami prikaza količine i dužine pukotina, varestraint varijanta 2 [1].....	91
Slika 67.	Ispitni zavar načinjen na površini uzorka, varestraint varijanta 3 [1]	93
Slika 68.	Nanešeni sloj razvijača na površini uzorka, varestraint varijanta 3 [1].....	94
Slika 69.	Uvećani prikaz mjesta nastanka pukotina, varestraint varijanta 3 [1].....	94
Slika 70.	Makro izbrusak, varestraint varijanta 3 [1]	94
Slika 71.	Dijagrami prikaza količine i dužine pukotina, varestraint varijanta 3 [1].....	95
Slika 72.	Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavara, T-spoj varijanta 1 [1]	98
Slika 73.	Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavara, penetranti - T-spoj varijanta 1 [1].....	98
Slika 74.	Dijagrami prikaza količine i dužine pukotina, kutni spoj varijanta 1 [1].....	99
Slika 75.	Makro izbrusak, kutni spoj varijanta 1 [1]	99
Slika 76.	Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavara, T-spoj varijanta 2 [1]	101
Slika 77.	Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavara, penetranti - T-spoj varijanta 2 [1].....	101
Slika 78.	Dijagrami prikaza količine i dužine pukotina, kutni spoj varijanta 2 [1].....	102
Slika 79.	Makro izbrusak, kutni spoj varijanta 2 [1]	102
Slika 80.	Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavara, T-spoj varijanta 3 [1]	104
Slika 81.	Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavara, penetranti - T-spoj varijanta 3 [1].....	104
Slika 82.	Dijagrami omjera količine i dužine pukotina, kutni spoj varijanta 3 [1].....	105
Slika 83.	Makro izbrusak, kutni spoj varijanta 3 [1]	105
Slika 84.	Dijagram omjera broja i duljine pukotina za varestraint ispitivanje [1].....	106
Slika 85.	Granična područja rizika od nastajanja toplih pukotina, [67]	107
Slika 86.	Dijagram omjera broja i duljine pukotina za kutni spoj ispitivanje [1].....	108

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Ovisnost karaktera zamke o energiji vezivanja atoma vodika [5, 8, 9].....	14
Tablica 2.	Klasifikacija elektroda prema količini vodika koje unose u zavareni spoj [8]....	20
Tablica 3.	Klasifikacija elektroda prema vremenu sušenja prije početka zavarivanja [8] ...	21
Tablica 4.	Klasifikacija taljivih žica prema količini vodika koje unose u zavareni spoj [8]	21
Tablica 5.	Klasifikacija uključaka oksida prema vrsti nastanka [5]	48
Tablica 6.	Kemijski sastav materijala S355NL izražen u postocima [69]	59
Tablica 7.	Kemijski sastav materijala S355NL izražen u postocima dobiven XFR analizom [1]	59
Tablica 8.	Mehanička svojstva S355 NL [70]	59
Tablica 9.	Udarne radnja loma S355 NL [70]	59
Tablica 10.	Kemijski sastav dodatnog materijala ER 309 LSi [72]	60
Tablica 11.	Preporuka proizvođača za odabir parametara za zavarivanje [74]	60
Tablica 12.	Očekivane vrijednosti mehaničkih svojstava dobivene nakon zavarivanja [72].	61
Tablica 13.	Orijentacijski kemijski sastav žice izražen u postocima [73]	61
Tablica 14.	Očekivane mehaničke vrijednosti zavarenog spoja [73]	61
Tablica 15.	Različiti setovi parametara za tri varijante pokusa [1]	66
Tablica 16.	Preliminarni izračun unosa topline prije procesa zavarivanja [1]	67
Tablica 17.	Parametri za zavarivanje ukutnih pločica na ispitnom uzorku [1]	71
Tablica 18.	Različiti setovi parametara za tri varijante pokusa [1]	74
Tablica 19.	Klasifikacija pukotina prema normi HRN EN ISO 6520-1:2007 [5, 77].....	82
Tablica 20.	Parametri za zavarivanje korišteni za Vareststraint varijantu 1 [1]	85
Tablica 21.	Popis i oznaka pukotina zabilježenih na Vareststraint varijanti 1 [1].....	85
Tablica 22.	Parametri za zavarivanje korišteni za Vareststraint varijantu 2 [1]	88
Tablica 23.	Popis i oznaka pukotina zabilježenih na Vareststraint varijanti 2 [1].....	89
Tablica 24.	Parametri za zavarivanje korišteni za Vareststraint varijantu 3 [1]	92
Tablica 25.	Popis i oznaka pukotina zabilježenih na Vareststraint varijanti 3 [1].....	93
Tablica 26.	Popis i kategorizacija pukotina zabilježenih na T-spoj varijanti 1 [1]	96
Tablica 27.	Popis i oznaka pukotina zabilježenih na kutni spoj varijanti 1 [1].....	97
Tablica 28.	Popis i kategorizacija pukotina zabilježenih na T-spoj varijanti 2 [1]	100
Tablica 29.	Popis i oznaka pukotina zabilježenih na kutni spoj varijanti 2 [1].....	101
Tablica 30.	Popis i kategorizacija pukotina zabilježenih na T-spoj varijanti 3 [1]	103
Tablica 31.	Popis i oznaka pukotina zabilježenih na kutni spoj varijanti 3 [1].....	104

POPIS OZNAKA

Oznake	Opis	Mjerna jedinica
Q	Toplinska energija	kJ/mm
U	Napon struje	V
I	Jakost struje	A
v	Brzina zavarivanja	m/s
T	Temperatura	K
p	Parcijalni tlak	Pa
ΔE_B	Energija vezanja	J
ΔG_0	Energija disocijacije	J
K_S	Ravnotežna konstanta reakcije	/
R	Univerzalna plinska konstanta	J/mol K
E	Youngov modul elastičnosti	Gpa
α	Koeficijent toplinske dilatacije	mm/mK
η	Iskoristivost procesa zavarivanja	%
R _m	Vlačna čvrstoća	N/mm ²
R _{p0,2}	Konvencionalna granica razvlačenja	N/mm ²
A	Istezljivost	%
KU	Kontrakcija	J
H	Sadržaj vodika	ml H ₂ /100g
F	Sila	N
b	Širina zavora	mm
h	Visina zavora	mm
δ	Debljina osnovnog metala	mm
a	Visina kutnog zavora	Mm
v _{zav}	Brzina zavarivanja	mm/min
v _ž	Brzina dodavanja žice	mm/min
q	Protok zaštitnog plina	l/min
d	Promjer dodatnog materijala	mm
t	Vrijeme	s
Φ_v	Svjetlosna energija	lm

POPIS KRATICA

REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG/MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog/aktivnog plina (<i>eng. metal inert/active gas</i>)
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom sa ili bez dodatnog materijala (<i>eng. tungsten inert gas</i>)
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
PPŽ	Praškom punjena žica (<i>eng. Flux cored arc welding</i>)

SAŽETAK

Cilj diplomskog rada jest uspostavljanje novog sustava i sistematizacija gradiva iz područja zavarljivosti, korištenjem međunarodnih normi kao podloge u svrhu izrade dijela opširne skripte i kolegija na e-learning servisu <http://e-ucenje.fsb.hr/>.

Diplomski rad će se u prvom dijelu temeljiti na razradi tehničkog izvještaja ISO/TR 581:2005 te će služiti kao smjernica za izradu teoretske podloge. Ovisno o vrsti materijala, predodžba o zavarljivosti će ovisiti o količini korištenih smjernica iz navedenog tehničkog izvještaja.

Svrha ovakvog pristupa je stvaranje razumljive i praktično korisne baze podataka kojom će se budući inženjeri zavarivanja moći koristiti kao osnovom za pristupanje zavarivanju svih vrsta čelika navedenim prema normi HRN EN ISO 15608:2005, odnosno klasificiranih prema tehničkom izvještaju ISO/TR 20172:2006.

Drugi dio rada će sadržavati opis i razradu eksperimenta s ciljem provjere osjetljivosti čelika S355 na tople pukotine kada se kao dodatni materijal koristi žica od nehrđajućeg čelika ER 309 LSi. Svrha niza eksperimenata je otkrivanje kritičnog seta parametara kojim će se izazvati pojava pukotina.

Zaključak će biti doveden analizom pretpostavljenih i ispitanih rezultata u spregu s teoretskom podlogom i preporukama iz normi, te će kao zaključak biti dan kvalitativan odnosno atributivan iskaz o zavarljivosti navedenog čelika.

Ključne riječi: tople pukotine, Varestraint ispitivanje, samoukrućeni T-spoj ispitivanje, zavarljivost

SUMMARY

Aim of the master thesis is establishment of entirely new system of operation and systematization of knowledge regarding weldability of metal materials, by using the international industrial standards as a basis for producing detailed information background which can be later used as the e-learning material on internet service <http://e-ucenje.fsb.hr/>.

In the first part of the master thesis, technical report ISO/TR 518:2005 shall be explained in detail and it shall serve as a guideline for producing detailed theoretical background. Depending on the type of material, general report on weldability shall be made by using relevant subtopics from technical report ISO/TR 518:2005.

Purpose of said approach is the creation of understandable and practically useful data bank which can be used by students and future welding engineers as the most convenient tool when approaching the problems regarding weldability of metal materials classified in industrial standard HRN EN ISO 15608:2005 and listed in technical report ISO/TR 20172:2006.

In the second part of the master thesis experiment was made in order to evaluate sensitivity of steel S355 to hot cracking when joined with stainless steel ER 309 LSi consumable wire. Purpose of the experiments was to determine critical parameters which will induce the said cracking.

Conclusion shall be drawn by analysing presumed and tested results in combination with theoretical background and recommendation drawn from industrial standards in order to give a qualitative statement regarding the weldability of said steel.

Key words: hot cracking, Varestraint test, selfrestrained T-joint test, weldability

1. UVOD

Sustav za određivanje zavarljivosti čelika se temelji najprije na odabiru čelika prema uporabnim svojstvima te se zatim klasificira prema kemijskom sastavu danom u tehničkoj preporuci ISO/TR 20172:2006 i svrsta u pripadajuću grupu čelika prema normi HRN EN ISO 15608:2005. S obzirom na očekivana uporabna svojstva i kemijski sastav, provodi se detaljno istraživanje osnovnog materijala koje će služiti kao temelj pristupanju tehničkom izvještaju ISO/TR 581:2005.

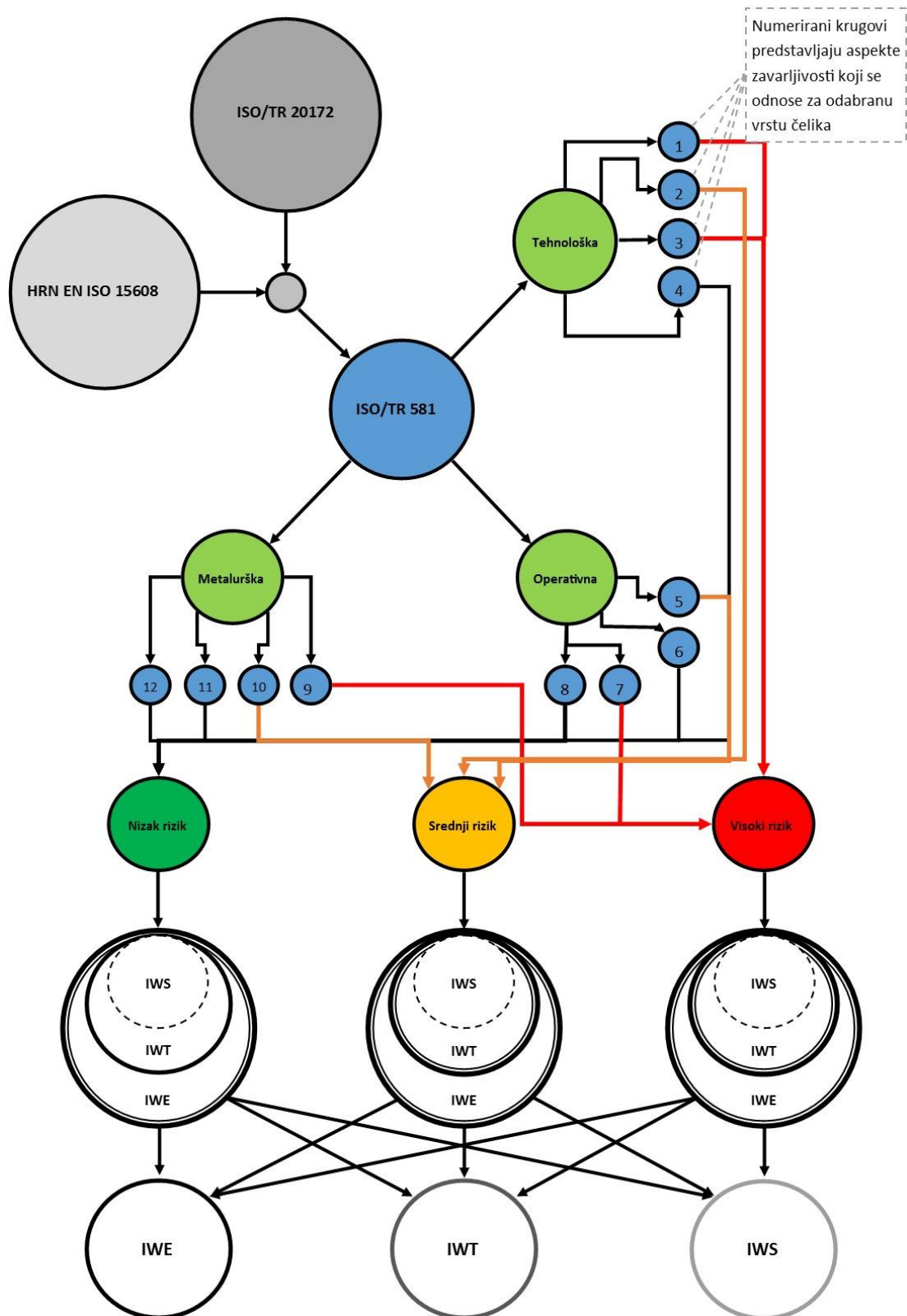
Korištenjem preliminarnih informacija se uz izvještaj provodi daljnje istraživanje stavki koje utječu na zavarljivost čelika. Unutar samog izvješća postoji 3 glavna poglavlja koja su sveukupno sačinjena od 38 potpoglavlja kojima se opisuju pojedini aspekti zavarljivosti materijala. Prema uputama navedenima u samoj normi, moguće je kvalitativno izraziti zavarljivost čelika korištenjem određenog dijela potpoglavlja iz norme, odnosno što je više potpoglavlja uključeno u razmatranje zavarljivosti čelika, to će sama zavarljivost čelika pod određenim uvjetima biti otežana.

Razlika u pristupu između uspostavljenih analitičkih metoda je njihova starost, odnosno nepotpunost s obzirom na današnje napretke u području metalurgije te je iskaz o zavarljivosti često vrlo kompleksno kvantitativno izraziti. Zbog tog razloga se zavarljivost uspješno i uz prihvatljiva odstupanja kvalitativno izražava.

Nakon dobivenih informacija o zavarljivosti čelika, sustavom se te informacije dalje trebaju filtrirati u prema kompleksnosti pojedinog potpoglavlja odnosno stavke koja je otežavajući čimbenik sa aspekta zavarljivosti čelika. Svaka od informacija nakon što je analizirana, rangirana prema kritičnosti i sortirana u pripadajuće poglavlje se dalje rekombinira prema sljedećem kriteriju.

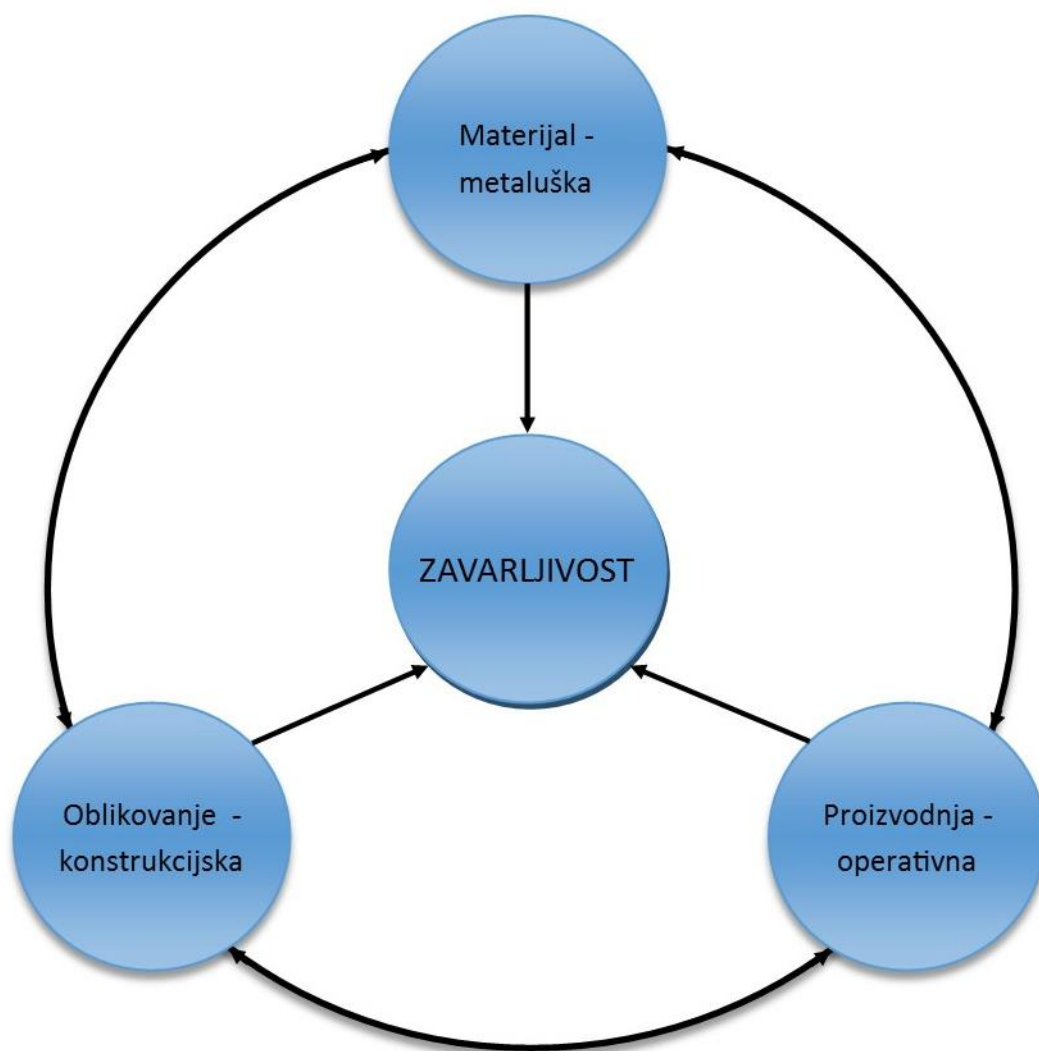
Prema normi HRN EN ISO 14731:2006 dan je pregled zavarivačkog osoblja – njihovih funkcija i dužnosti, koje ustanova za proizvodnju zavarenih konstrukcija mora imati. U ovisnosti o tome koju funkciju osoba obnaša, sustav će omogućavati uvid u nužnu količinu informacija koja je relevantna za navedenu osobu te će se te informacije proširivati sa povećanjem odgovornosti posla i složenosti procesa zavarivanja.

Tako na primjer inženjeri zavarivanja moraju imati uvid u sve informacije koje se tiču procesa zavarivanja, dok tehnolozi zavarivanja moraju imati nešto manji uvid u informacije koju su dovoljne i nužne da izvrše svoje obaveze. Specijalisti i zavarivači bi sustavom dobili uvid isključivo informacije u obliku specifikacije procedure zavarivanja nužne za izradu konkretnog zavarenog spoja bez dodatnih informacija koje bi mogle biti za tu razinu nepotrebne.



Slika 1. Shematski prikaz teoretskog sustava za određivanje zavarljivosti [1]

2. SUSTAV ODREĐIVANJA ZAVARLJIVOSTI



Slika 2. Shematski prikaz ključnih aspekata zavarljivosti prema normi ISO/TR 581 [2]

2.1. Metalurška zavarljivost:

Materijal posjeduje metaluršku zavarljivost ako je nakon procesa zavarivanja, svojim kemijskim sastavom, metalurškim i fizikalnim svojstvima ostvaren zavareni spoj koji zadovoljava kriterije prihvatljivosti. [2]

Što je broj parametara koji utječu na zavarljivost tijekom izrade specifikacije parametara za zavarivanje manji, to se smatra da je metalurška zavarljivost uvjetno bolja za istu grupu čelika prema normi HRN EN ISO 15608. [2]

Faktori koji utječu na metaluršku zavarljivost su sljedeći: [2]

a) Svojstva kemijskog sastava

- Sklonost prema hladnim pukotinama - krhkom lomu
- Sklonost prema starenju materijala
- Sklonost prema otvrdnjavanju
- Sklonost prema toplim pukotinama
- Ponašanje rastaljenog materijala – taline
- Temperatura taljenja
- Temperatura izgaranja

b) Metalurška svojstva - ovise o proizvodnim metodama čeličane, kao što su ekstruzija, valjanje, lijevanje, kovanje, hladna i topla deformacija, toplinska obrada, dezoksidacija itd.

- Mikro i makro segregacije
- Uključci nečistoća
- Anizotropnost kristalne strukture
- Veličina zrna
- Formacija mikrostrukture

c) Fizikalna svojstva

- Svojstva toplinske dilatacije materijala
- Svojstvo toplinske provodljivosti
- Točka tališta
- Mehanička svojstva – čvrstoća i žilavost materijala

2.2. Konstrukcijska zavarljivost:

Materijal posjeduje konstrukcijsku zavarljivost ako je nakon procesa zavarivanja ostvaren zavareni spoj koji zadovoljava kriterije nosivosti za predviđeni spektar naprezanja. [2]

Faktori koji utječu na konstrukcijsku zavarljivost su sljedeći: [2]

a) Oblikovanje konstrukcije

- Raspodjela naprezanja na zavarenoj konstrukciji
- Lokacija zavarenih spojeva
- Debljina radnog komada
- Zarezno djelovanje
- Razlike u krutosti

b) Uvjeti naprezanja

- Vrsta i iznos naprezanja
- Dimenzijska raspodjela naprezanja
- Brzina djelovanja naprezanja
- Temperature
- Korozijski procesi

2.3. Operativna zavarljivost:

Operativna zavarljivost zavarene konstrukcije je postojeća ako se projektirani zavareni spojevi mogu izvesti pod pravilnim i pravilno odabranim parametrima za zavarivanje. [2]

Što je broj parametara koji utječu na oblikovanje konstrukcije za pojedini materijal, to je operativna zavarljivost zavarivačke procedure bolja. [2]

a) Priprema za proces zavarivanja:

- Vrsta zavarenog spoja
- Oblik zavarenog spoja

b) Proces zavarivanja uključuje:

- Jedan ili više zavarivačkih procesa
- Jednu ili više vrsta dodatnog materijala
- Propisani redosljed zavarivanja
- Predgrijavanje
- Položaji za zavarivanje
- Povoljnost okolišnih uvjeta

c) Toplinska obrada prije i poslije procesa zavarivanja:

- Toplinska obrada nakon procesa zavarivanja (Post Weld Heat Treatment – PWHT)
- Mehanička obrada
- Kemijska obrada

Svrha određivanje zavarljivosti:

Tijekom izrade zavarene konstrukcije, glavni je zadatak postići nosivost konstrukcije prema zadanim uvjetima te uz kombinaciju sa adekvatnim faktorom sigurnosti osigurati minimalnu cijenu izrade. Kako bismo osigurali osnovni zahtjevi, preporuča se uzeti u obzir sve tri vrste faktora zavarljivosti koji pojedinačno mogu imati presudnu važnost – materijal, oblikovanje i parametri za zavarivanje. [2]

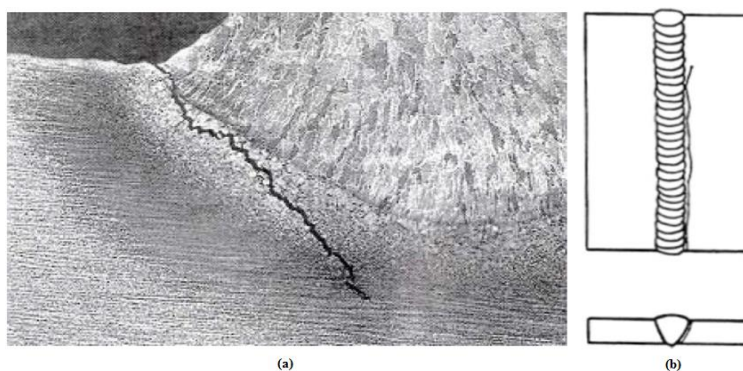
2.4. Metalurška zavarljivost – svojstva kemijskog sastava:

2.4.1. Sklonost prema hladnim pukotinama:

Karakteristike hladnih pukotina:

Hladne pukotine ili vodikom izazvane pukotine su defekti izazvani kontaminacijom mikrostrukture zavarenog spoja vodikom. Prema svojoj prirodi su to vrsta pukotina koje nastaju uz vremenski odmak poslije završetka postupka zavarivanja ili nanošenja slojeva metala zavara na površinu materijala, a očekivan vremenski raspon nastajanja je 2 – 48 sati. U obzir svakako treba uzeti da su pojedini čelici osjetljivi na nastanak hladnih pukotina danima tjednima ili mjesecima nakon završetka postupka zavarivanja. [4, 5]

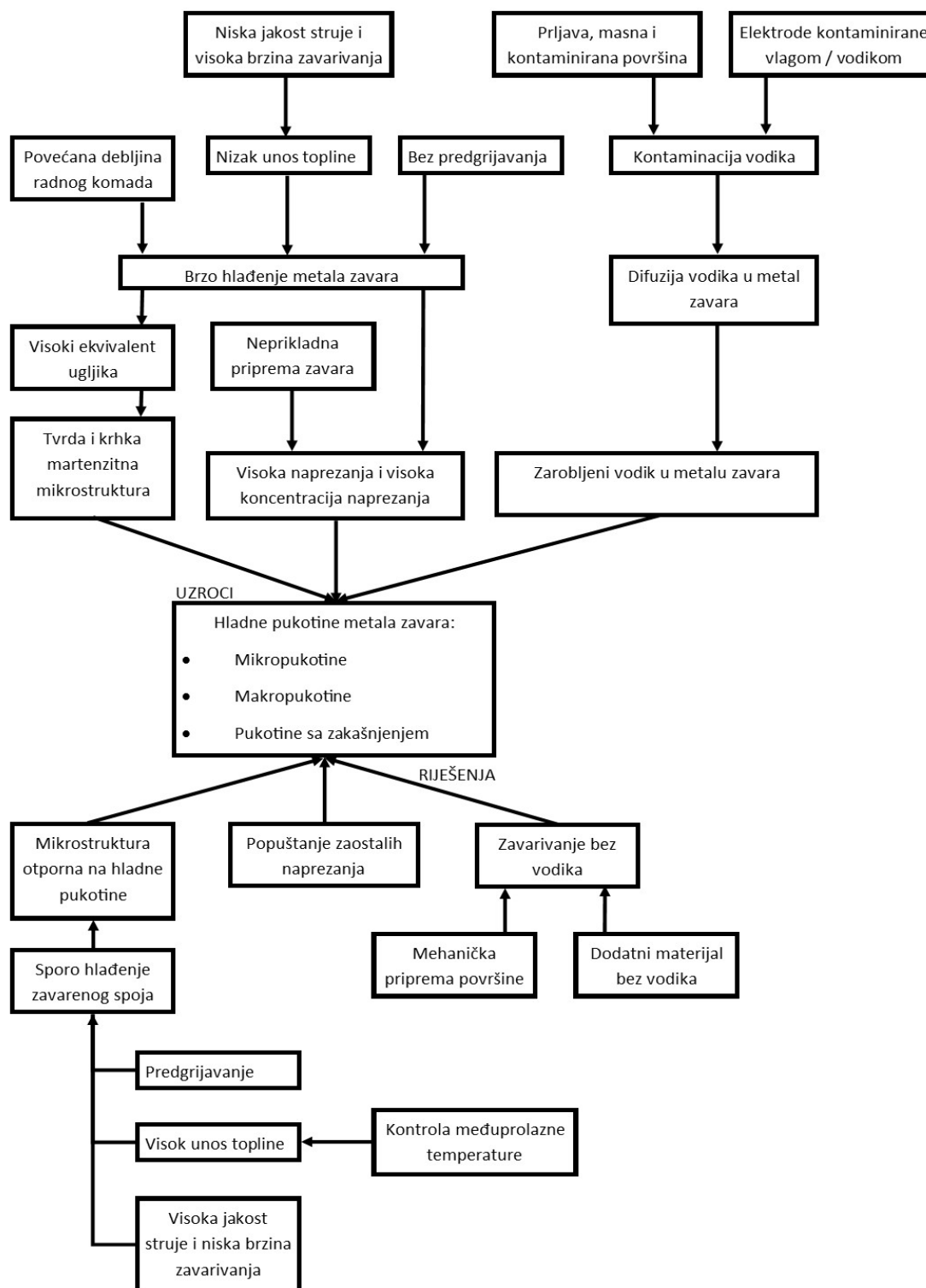
Temperaturno područje unutar kojeg hladne pukotine nastupaju varira prema različitim literaturama, tako se u europskim i jugoslavenskim smjernicama može pronaći podatak da se hladne pukotine javljaju unutar temperaturnog područja od 250 °C do 200 °C, dok se u američkim i britanskim smjernicama može pronaći podatak da se hladne pukotine javljaju unutar temperaturnog područja od 150 °C do - 60 °C. Radi jednostavnosti i komformiranju domaćih standarada, uzima se temperaturno područje od 250 °C do 200 °C uz napomenu da se pukotine ove vrste zabilježeno javljaju pri nižim temperaturama. [5, 6, 7]



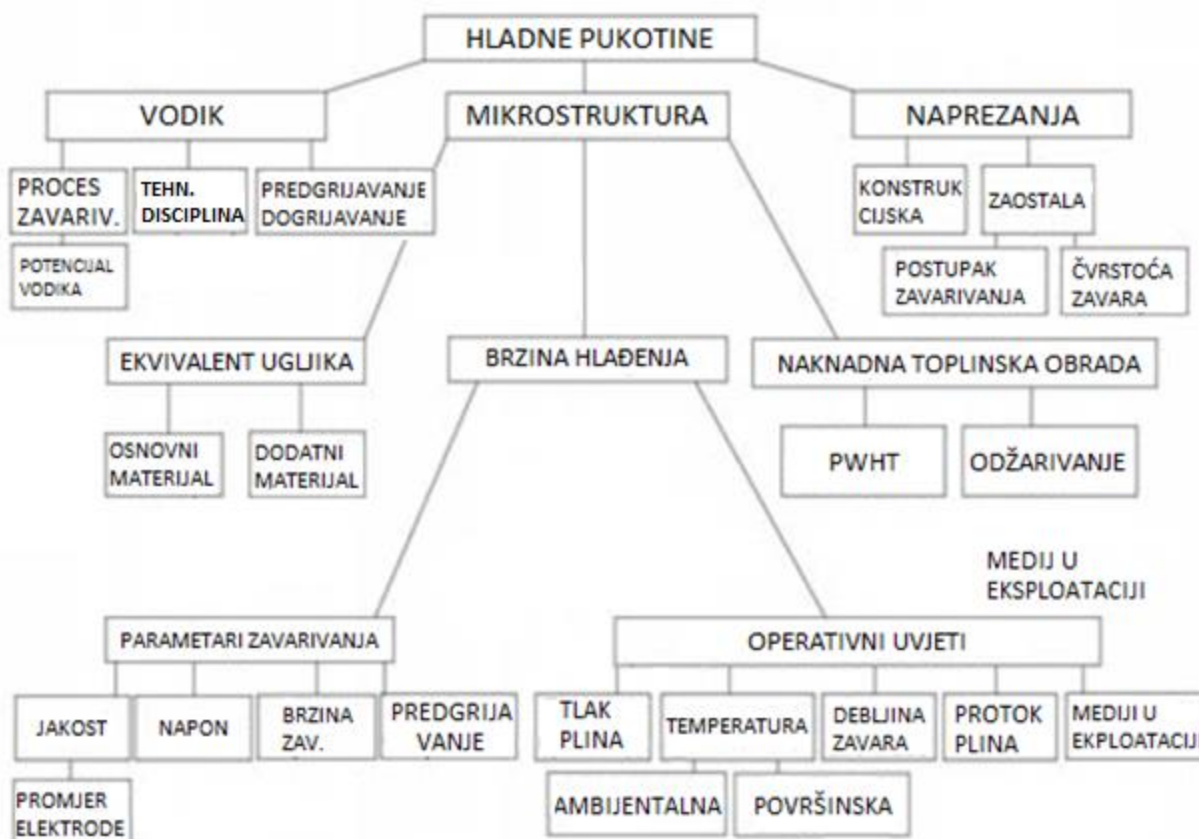
Slika 3. Propagacija hladne pukotine [8]

Na slici 3 (a) – presjek zavarenog spoja prikazuje je hladnu pukotinu nastalu na samoj liniji staljivanja, (b) – shematski prikaz u tlocrtu i nacrtu širenja hladne pukotine na liniji staljivanja.

Utjecajni parametri na mehanizam nastanka hladnih pukotina:



Slika 4. Shematski prikaz uzroka i rješenja nastanka hladnih pukotine unutar metala zavora [9]



Slika 5. Shematski prikaz općih utjecajnih faktora na nastanak hladnih pukotina [8]

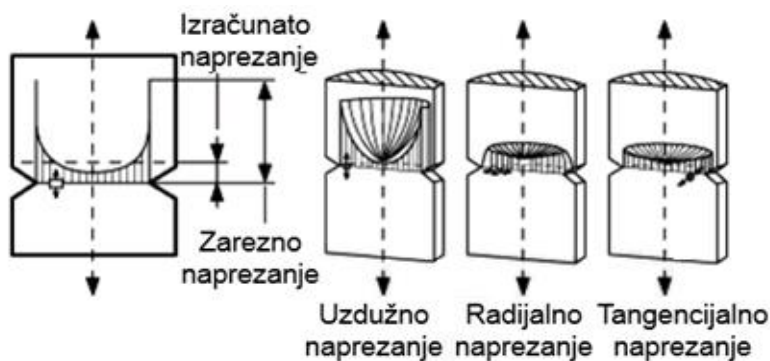
Postoje različite teorije o mehanizmima nastanka hladnih pukotina, a konvencionalan model koji je do nedavno bio zastupljen se trenutno sve više mijenja kako ispitivanja i shvaćanje mehanizma nastanka pukotina napreduju. [8, 9]

Zastarjela hipoteza je zastupala stajalište da tijekom zavarivanja nastaju mikro pore i šupljine unutar kojih je otopljen vodik u kristalnoj rešetci. Difuzijom atomarnog vodika iz kristalne rešetke u mikro pore i šupljine tijekom vremena dovodi do spajanja vodika unutar šupljina u njegovo plinovito stanje. Nakupljanjem vodika unutar pora izaziva povećanje tlačnog napreznja unutar samog materijala te se zbog toga stvara sklonost spajanja mnogobrojnih poroziteta. Spajanjem mikro poroziteta i nastankom mikro pukotina koje imaju sposobnost daljnje propagacije tijekom životnog ciklusa konstrukcije je konvencionalno shvaćanje manifestacije hladnih pukotina. [6, 9]

Hipoteza prema literaturi American Welding Society – Welding Handbook: Metals and their weldability se objašnjava takav fenomen na sljedeći način. Prije i poslje procesa zavarivanja, metal sadrži defekte kao što su uključci, dislokacije, pore i slične nepravilnosti što uzrokuju zarezno djelovanje. Posebna opasnost koju zarezno djelovanje implicira je dvoosno i troosno stanje naprezanja. Difundiranjem i koncentriranjem vodika na područje defekata smanjuju se kohezijske sile i povećava unutrašnje naprezanje mikrostrukture. Smanjenje kohezijskih sila je rezultat distorzije kristalne rešetke metala zavora kroz koju vodik difundira i unosi razdor između relativnih odnosa atoma metala zavora. [8, 9, 10]



Slika 6. Koncentracija naprezanja koje izaziva lokalna distorzija kristalne rešetke [10]



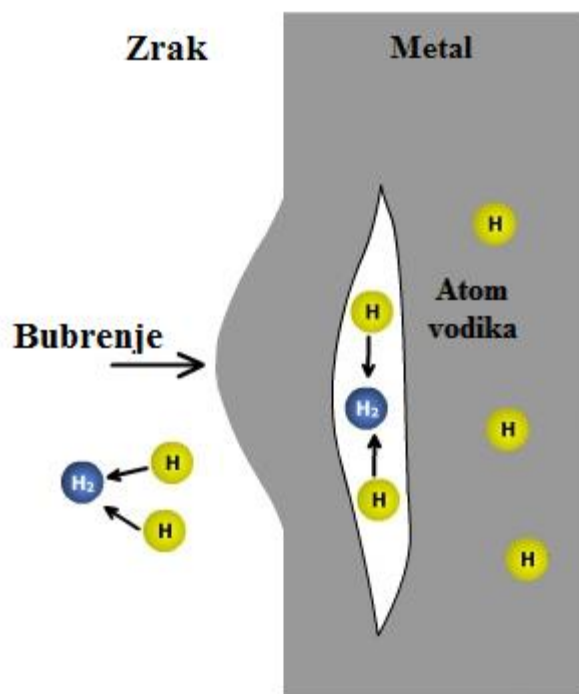
Slika 7. Raspodjela naprezanja izazvanih lokalnom distorzijom kristalne rešetke [10]

Prema teoriji gore navedenoj, u zavarenom spoju je difuzija vodika sputana „zamkama za vodik“ koje su zapravo defekti mikrostrukturne rešetke. Oba termina se mogu razdijeliti na sljedeće pojmove: [6, 8]

- Ireverzibilne zamke i zaostali vodik
- Reverzibilne zamke i difuzijski vodik

Ireverzibilne zamke su opasnije zbog veće količine energije kojom vežu vodik - ($|\Delta E_B| \geq 50 \text{ kJ/mol}$) što bi značilo da je temperatura potrebna za oslobađanje vodika iz kristalne rešetke viša od 600°C . Ovakva činjenica povlači za sobom zaključak da je zaostali vodik aktivan do temperature do 600°C te da nakon nje on više ne sudjeluje u difuziji vodika i nema daljnji utjecaj na razvoj vodikom izazvanih pukotina. [7, 8, 9]

Difuzijski vodik se veže na reverzibilne zamke i lako reverzibilne zamke koje imaju manju energiju vezanja vodika ($|\Delta E_B| \leq 30 \text{ kJ/mol}$) i ($|\Delta E_B| \leq 7.5 \text{ kJ/mol}$) te je zbog toga omogućeno oslobađanje vodika iz kristalne rešetke pri niskim temperaturama od 45°C . [8, 9]

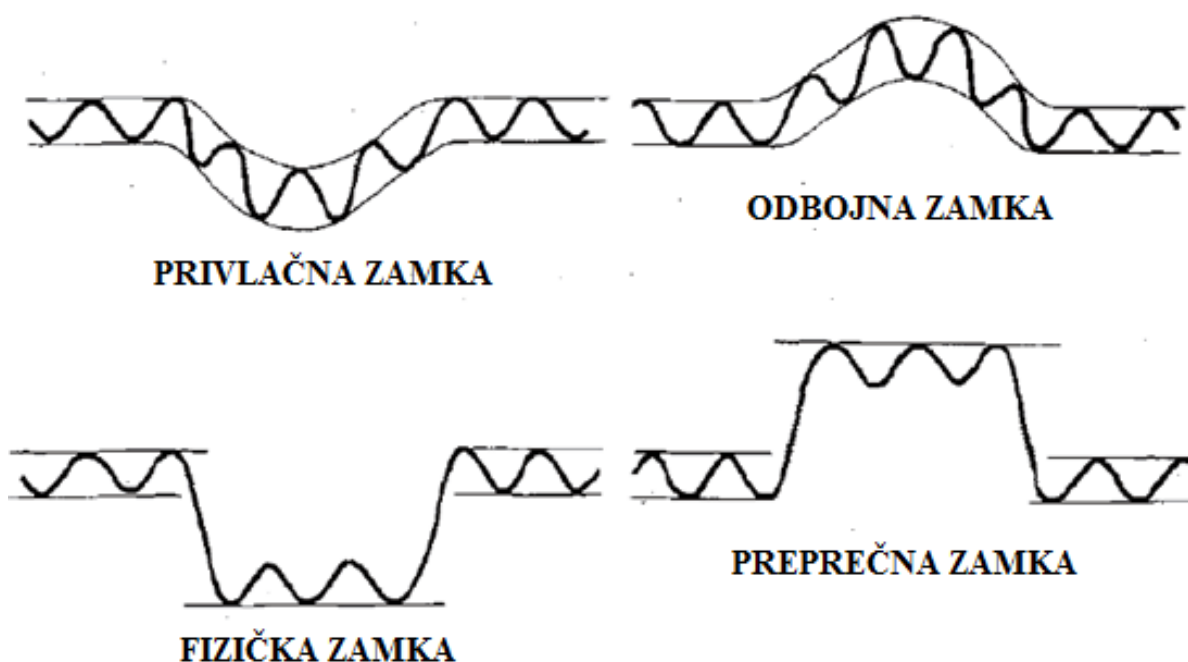


Slika 8. Spajanje monoatomnog vodika u dvo atomni oblik unutar pora u metalu [11]

Difuzija vodika iz metala zavara u ZUT se odvija tijekom pretvorbe iz austenitne u feritnu mikrostrukturu. Rastvorljivost vodika u feritnoj strukturi nije moguća u istoj mjeri kao što je to u austenitnoj strukturi te je zbog navedenog efekta se rastvorljivost vodika u metalu zavara naglo smanjena i velika količina vodika ostaje zarobljena u ZUT-u. Vodik koji je ostao u području metala zavara nalazi se u disociranom stanju na višim temperaturama te pri padu temperature ispod 200 °C može prijeći na određenim slobodnim površinama iz disociranog u molekulsko stanje – pri čemu nastaje visok unutrašnji pritisak. [6]

U slučaju sumnje da zavareni spoj sadrži prekomjerne količine otopljenog difuzijskog vodika, spoj se ispituje neposredno nakon zavarivanja na savijanje. Ako se javljaju površinske pukotine već pri malim kutevima savijanja, može se zaključiti da je difuzijski vodik na mjestu pora prešao u molekulski, te se daljnjim savijanjem otkrivaju greške nazvane „riblje oči“ zbog svog karakterističnog izgleda. Ovakva pojava se ne klasificira kao hladna pukotina. [6, 9]

Podjela zamki za vodik je prikazana na slici ispod:



Slika 9. Vrste zamki za vodik koje nastaju kao distorzija kristalne rešetke [8]

Tablica 1. Ovisnost karaktera zamke o energiji vezivanja atoma vodika [5, 8, 9]

Zamka za vodik	Energija vezivanja (kJ/mol)	Temperatura za oslobađanje (°C)
<u>Vrlo reverzibilne:</u> Intersticijski kristali, područje elastičnih naprezanja, dislokacije	< 7.7	30
<u>Reverzibilne:</u> Titanom supstituairani atom, granica zrna, dislokacija, karbidi	17 - 36	112 – 270
<u>Irverzibilne:</u> Mikroporoziteti, uključci oksida: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , MnS , Al_2O_3 , SiO_2 , TiC , Ce_2O_3	37 - 129	305 - 720

Kada unutrašnja naprezanja porastu iznad granice razvlačenja (Re) pucanje materijala nastaje spontano kada jednodimenzionalni defekt poput dislokacije postane dvodimenzionalni te zatim trodimenzionalna volumenska greška. Ponavljanje ovakvog ciklusa rezultira povećanjem volumena greške te sve učestalijom propagacijom pukotine. Ovakav model je sukladan sa sporij i diskontinuiranoj naravi ovog procesa. [12, 14]

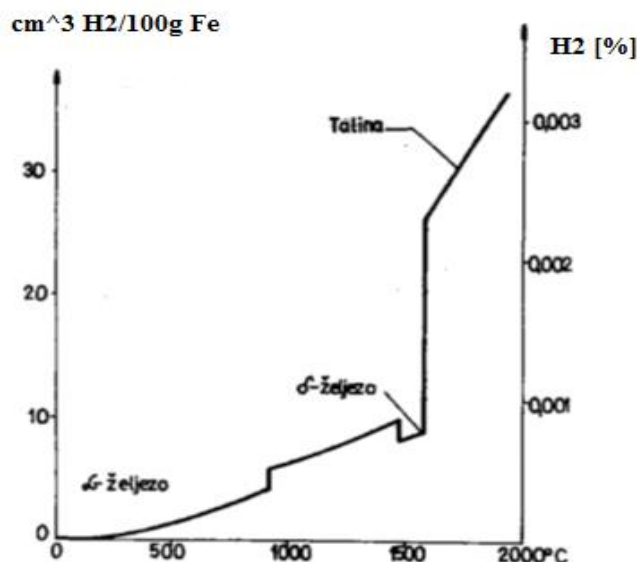
Topivost vodika

Difuzija vodika u metal zavara može doći iz mnogobrojnih izvora, a kako bi se tehnološka disciplina procesa zavarivanja održala na što višoj razini, svaki se utjecaj pojedinih izvor mora pravilno minimalizirati. Izvori su navedeni prema potencijalu unošenja vodika u metal zavara: [6, 9]

- Električni luk
- Sastav i nečistoće na dodatnom materijalu
- Sastav i nečistoće na osnovnom materijalu
- Vlažnost okolnog zraka

Topivost vodika po fazama pretvorbe čelika:

Topivost vodika ovisi o temperaturi, tlaku i strukturi kristalne rešetke čelika. Tijekom procesa zavarivanja se kod pojedinih vrsta čelika može uočiti pretvorba feritne strukture u austenitnu strukturu na temperaturama iznad 911 °C. Povećanjem temperature se također povećava i topivost vodika te je gradijent apsorpcije vodika u austenitnoj veći nego u feritnoj strukturi. [11, 15]



Slika 10. Topivost vodika pri normalnom atmosferskom tlaku [12]

Formiranjem kupke rastaljenog metala, topivost vodika skokovito raste te je u japanskoj literaturi zabilježena topivost od 34 ppm pri 1600 °C i okolišnim tlakom od 1.025 bara. S obzirom da je topivost vodika pri sobnoj temperaturi značajno manja (0.0003 ppm za feritne čelike i 0.4 ppm za martezitne čelike, pri 20 °C i 1.025 bara), tijekom metastabilnog hlađenja većina otopljenog vodika ostaje zarobljena u zavarenom spoju i se time rizik od hladnih pukotina značajno povećava. [8, 15]

Topivost vodika u zavarenom spoju preko električnog luka

Dva zakona kojima se opisuju mehanizmi i efekti topivosti vodika su Sievertov i Gedeonov zakon. Sievertov zakon opisuje topivost dvoatomnih plinova (H_2) u kupki rastaljenog metala te kao takav se ne smatra potpuno adekvatnim za opisivanje topivosti vodika tijekom procesa zavarivanja. Sievertov zakon glasi: u izotermičkom zatvorenom sustavu, ravnotežna koncentracija plina vodika u rastaljenom čeliku izloženom okolišnoj atmosferi je proporcionalna drugom korijenu parcijalnog tlaka dvoatomnog plina u okolini rastaljenog metala. [8, 9]

$$H = K_S \cdot \sqrt{P_{H_2}} = \sqrt{P_{H_2}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_0}{RT}\right) [l] \quad (1)$$

H – Ravnotežna koncentracija otopljenog vodika u rastaljenom metalu [l]

P_{H_2} – Parcijalni tlak vodika u okolini rastaljenog metala [Pa]

ΔG_0 – Energija disocijacije vodika u rastaljeni metal [J]

K_S – Ravnotežna konstanta reakcije, smanjuje se eksponencijalno sa snižavanjem temperature

R – Univerzalna plinska konstanta [J/mol K]

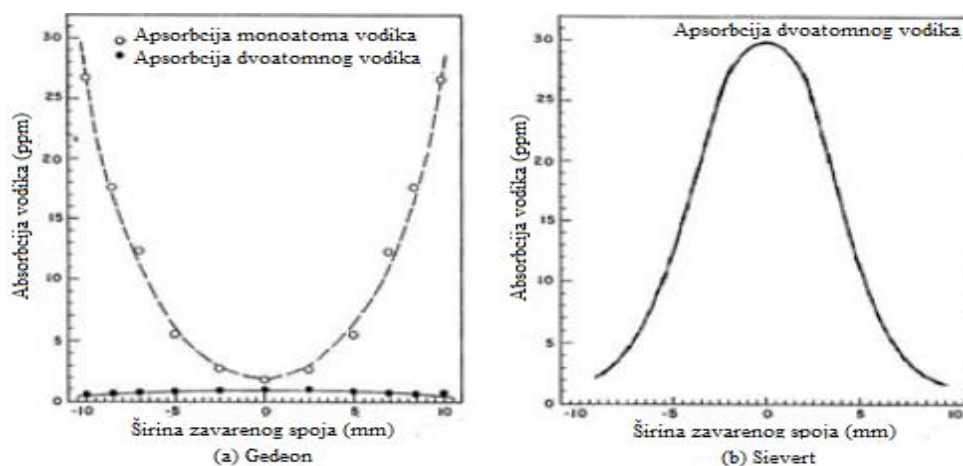
T – Temperatura kupke rastaljenog metala [K]

Glavni nedostatak Sievertovog zakona je činjenica da zakon ne uzima u obzir topivost monoatomnih plinova vodika koji nastaju ionizacijom i disocijacijom vodika u stupu plazme električnog luka. Također je otkriveno da je topivost dvoatomnih plinova značajno veća kada je kupka rastaljenog metala u kontaktu sa stupom plazme električnog luka nego što je Sievertov zakon to predvidio. [8, 9]

Kontradiktornost koja nastaje korištenjem ovog zakona se javlja prilikom izračuna temperature kupke rastaljenog metala. Analizom količine otopljenog vodika dobivamo da bi za stvarnu količinu vodika temperatura taline (kupke rastaljenog metala) morala biti znatno viša od 2500 °C, što je ujedno i maksimalna postiziva temperatura rastaljenog metala uopće. Gedeonov zakon uzima u obzir efekt stupa plazme električnog luka na topivost vodika u monoatomnom i dvoatomnom obliku, te je kao takav adekvatan za opisivanje procesa difuzije vodika tijekom procesa zavarivanja. [6, 8]

Gedeonov model se temelji na dvije pretpostavke:

1. Temperatura stupa plazme električnog luka je dovoljna da uzrokuje disocijaciju atoma vodika H_2 u ione vodika H^+ .
2. Apsorpcija iona vodika H^+ se odvija preko rastaljene površine metala zavora.



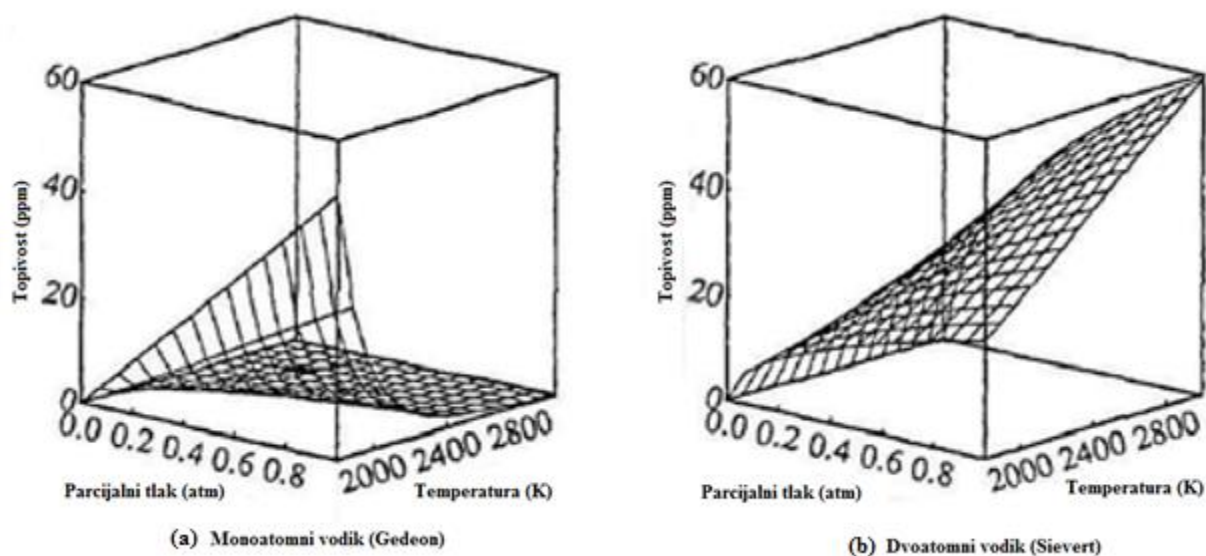
Slika 11. Dijagrami ponašanja apsorpcije vodika [8]

Na slici 11 (a) nalaze se podaci o topivosti vodika prema Gedeonovom modelu, dok se na slici (b) nalaze podaci o topivosti vodika prema Sievertovom modelu.

Topivost monoatomnog vodika je drugačija s obzirom na topivost dvoatomnog vodika. Vrijedi da topivost vodika pada s porastom temperature rastaljene kupke metala što dovodi do zaključka da će glavnina otopljenog vodika nalaziti na „hladnijim“ rubovima uz kupku rastaljenog metala zavora, to jest u području uz liniju staljivanja. [8, 9]

Ovakva formulacija je u proturječju sa Sievertovim modelom koji glasi da je najveća topivost ostvarena direktno ispod stupa plazme električnog luka. Sievertov model se temelji na porastu topivosti atoma vodika kao funkcijom parcijalnog tlaka vodika i temperature taline metala koja raste do određene točke zasićenja nakon koje vodik više ne difundira u kristalnu rešetku rastaljenog metala. [8, 9]

Gedeonov model predviđa da će topivost vodika primarno ovisiti o parcijalnom tlaku monoatomnog vodika i linearno rasti s njime, dok će topivost vodika također rasti, ali u manjem gradijentu s linearnim padom temperature kupke rastaljenog metala. Prema istraživanjima provedenim na britanskim sveučilištima, eksperimentalni podaci i analize podupiru tvrdnje Gedeonovog modela difuzije atoma i iona vodika. [8, 9]



Slika 12. Usporedni dijagrami za praćenje topivosti vodika [8]

Na slici 12 trodimenzionalni dijagram za praćenje topivosti: (a) – prema Gedeonovom modelu, (b) – prema Sievertovom modelu.

Topivost vodika u zavarenom spoju preko dodatnog materijala:

Jedan od načina kojim vodik ulazi u zavar je razlaganjem vlage koja se može pronaći u elektrodama, zaštitnom prašku, žici ili u zaštitnom plinu, pri visokim temperaturama. Količina difundiranog vodika od svih faktora, najviše ovisi o vrsti dodatnog materijala te vlazi koju je pojedina vrsta dodatnog materijala sposobna upiti prije početka zavarivanja. [8, 9, 19]

Kod ručnog elektrolučnog zavarivanja se za proizvodnju elektroda koristi vodeno staklo i vlaga kao vezivna sredstva za stvaranje obloge metalne žice koja čini jezgru elektrode. Ovisno o vrsti obloge se pojedine elektrode moraju različito sušiti kako bi se osigurao što manji unos vlage. [19]

Poseban oprez kod MIG/MAG zavarivanja se nepravilnim skladištenjem i rukovanjem žice se u skladištu ili u eksploataciji može nakupiti okom nevidljiva vlaga na površini koja će konstantno izazivati greške u zavarenom spoju i prekomjeran unos vodika. Plinska boca je drugi mogući izvor vodika u slučaju da je tijekom prethodnih eksploatacija bila potpuno ispražnjena te da je zbog podtlaka u boci bio usisan okolišni vlažan zrak. [7, 16, 19]

Prašak kod zavarivanja pod zaštitom praška ima identičan sastav kao i obloge elektroda za ručno elektrolučno zavarivanje te se posebna pažnja pridaje skladištenju i sušenju praška kako bi kontaminacija izbjegla. Zbog velike površine praška koji je izložen atmosferskog zraku, postoji mogućnost da prašak koji je korišten više puta od dozvoljenog na sebe primi prekomjerne količine vodika te time smanji kvalitetu zavarenog spoja. Žica za zavarivanje se mora čuvati u skladištu s kontroliranim uvjetima vlage i temperature kako bi se onemogućila kontaminacija. Ti uvjeti su prema pravilu norme HRN EN ISO 2560:2006 iznosi 43% vlažnost zraka i 20 °C temperatura prostorije. [8, 19, 20]

Klasifikacija unosa vodika dodatnim materijalom:

Klasifikacija se provodi prema četiri zastupljena internacionalna standarda unutar kojeg spadaju podjele prema: [7, 8, 18]

- AWS – American Welding Society
- IIW – International Institute of Welding
- AS/NZ – Australian / New Zealand Standards
- JIS – Japanese Industrial Standards

Tablica 2. Klasifikacija elektroda prema količini vodika koje unose u zavareni spoj [8]

Vrsta oznake za kontrolu unosa vodika u metal zavara	Difundirana količina vodika u metalu zavara (ml/100g)			
	ISO 2560 & IIW	AWS A 5.1	AS/NZ S 3752	JIS Z-3211 JIS Z-3212
Vrlo niska	≤ 5	≤ 4	≤ 5	≤ 6 (780 N/mm ²)
Niska	≤ 10	≤ 8	≤ 10	≤ 7 (750 N/mm ²) ≤ 9 (610 N/mm ²) ≤ 10 (570 N/mm ²)
Srednja	≤ 15	≤ 16	≤ 15	≤ 12 (520 N/mm ²) ≤ 15 (420 N/mm ²)
Visoka	≥ 15	≥ 16	-	-

Tablica 3. Klasifikacija elektroda prema vremenu sušenja prije početka zavarivanja [8]

Vrsta obloge	Elektroda	Uvjeti predgrijanja	Maksimalno dopušteni udio vlage [%]
Celulozna	E6010	Bez predgrijanja	-
Rutilna	E6013	Bez predgrijanja ili 125 °C/1h	-
Bazična	E70XX	250 °C/h	0.4
Bazična	E80XX	250 °C/h	0.2
Bazična	E90XX	250 °C/h	0.15
Bazična	E110XX	250 °C/h	0.15
Bazična	E110XX	250 °C/h	0.1

Tablica 4. Klasifikacija taljivih žica prema količini vodika koje unose u zavareni spoj [8]

Tehnologija zavarivanja	Sadržaj vodika (ml H ₂ /100g)
MIG/MAG zavarivanje sa plinovima Ar/CO ₂ <ul style="list-style-type: none"> Očišćena žica Neočišćena žica 	<ul style="list-style-type: none"> 2 ÷ 7 6 ÷ 12
Ručno elektrolučno zavarivanje <ul style="list-style-type: none"> Elektrode sušene na 400 ÷ 500 °C Neosušene bazične elektrode Elektrode sušene na 100 ÷ 150 °C Rutilne elektrode 	<ul style="list-style-type: none"> 3 ÷ 7 6 ÷ 12 12 ÷ 20 20 ÷ 35
Zavarivanje pod praškom: <ul style="list-style-type: none"> Čista žica i sušen prašak Neočišćena žica i neosušen prašak Zavarivanje punjenom žicom u CO₂ zaštitnoj atmosferi 	<ul style="list-style-type: none"> 5 ÷ 10 10 ÷ 25 10 ÷ 30

2.4.2. Sklonost prema starenju materijala:

Karakteristike starenja materijala:

Starenje je metalurška pojava tijekom koje se mijenjaju mehanička, fizikalna i kemijska svojstva metala ili legura izazvana termodinamičkom neravnotežom. Manifestacija starenja je difuzija atoma unutar kristale rešetke metala iz početnog neravnotežnog stanja u ravnotežno stanje pod specifičnim uvjetima koji dopuštaju takvu difuziju. [21]

Osnovni konstrukcijski materijali imaju sklonost prema starenju tijekom vremenskog perioda gdje se mijenja tekstura i boja površinskog sloja uslijed formiranja oksidnog sloja u početnoj fazi. Uz vremenski odmak, oksidni sloj se postepeno pretvara u hidroksilni sloj koji nastaje spajanjem kemijskih elemenata iz okolne atmosfere. Naposljetku je na površini metala formiran mineralni sloj otporan na bilo kakve daljnje promjene. [21]

Ovaj proces se spontano odvija kod metalnih materijala kao što su aluminij, bakar, legure bakra, olova, cinka i čelika. Često je tijekom proizvodnje čelika, proces starenja dio toplinske obrade kako bi se toplinski izravnale legure koje sadrže veće koncentracije Al, Cu, Mg i Ni. [6, 21]

U tehnici zavarivanja čelika, najveću opasnost od starenja predstavlja plin dušik te iako moderni umireni i vrlo umireni čelici sadrže male udjele dušika u svojoj strukturi ($< 0,003\%$), opasnost od starenja je i dalje vrlo prisutan utjecajan faktor. [6, 21]

Prirodno starenje materijala:

Odvija se spontano pri sobnoj temperaturi od 20°C tijekom dužeg vremenskog perioda koji može obuhvaćati više mjeseci. Prilikom zavarivanja čelika skloni prirodnom starenju važno je nakon zavarivanja osigurati kontroliranu atmosferu kako bi proces starenja dao predodređene rezultate. Razlog zbog kojeg se konstrukcija mora čuvati je zbog toga što postoji mogućnost od ulaska neželjenih kemijskih elemenata iz okolišne atmosfere u hidroksilni i mineralni sloj na površini čelika. [21]

Umjetno starenje materijala:

Umjetno starenje ili dozrijevanje se provodi pri povišenim temperaturama od 180°C do 450 °C, kako bi se povećala brzina kojom se promjena svojstava odvija. Vrlo se često ovakva vrsta starenja provodi nakon procesa kovanja, zavarivanja i lijevanja. [21, 22]

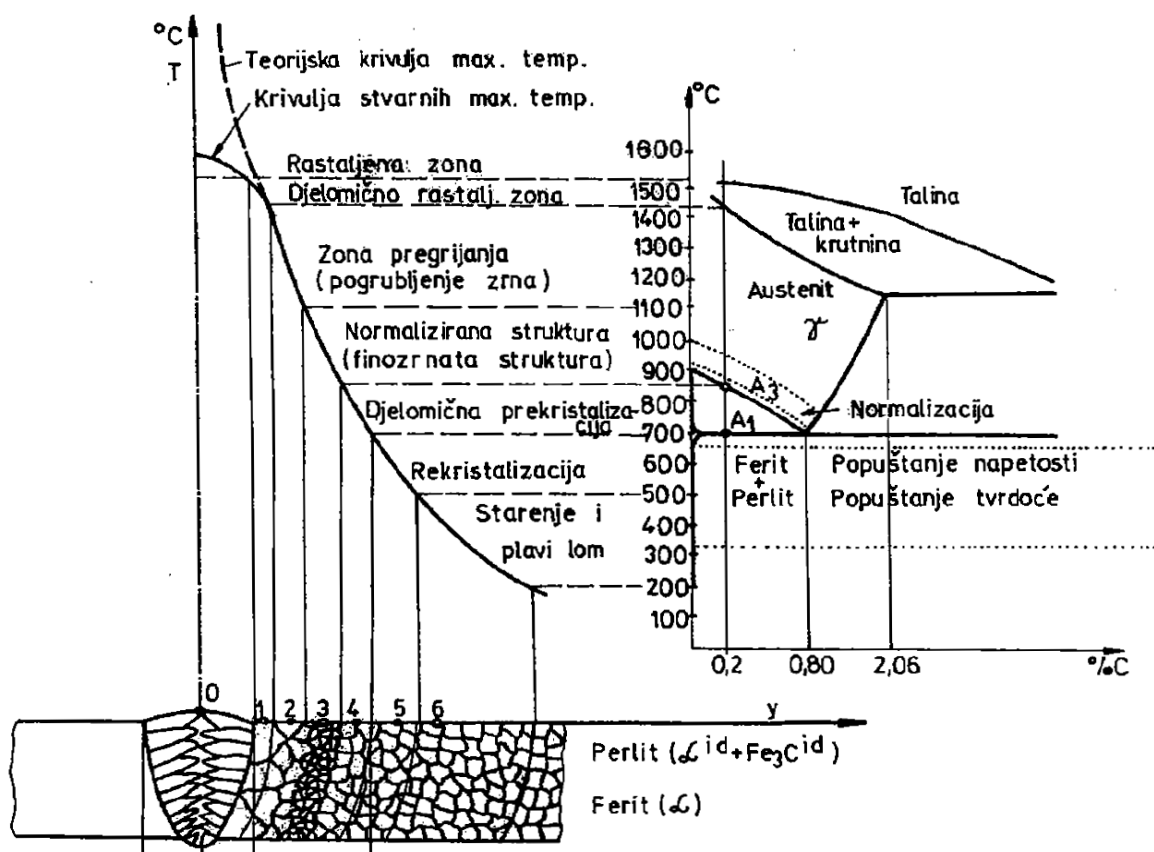
Ovaj proces osigurava visoku kvalitetu i točnost izrađenih dijelova u vrlo uskim tolerancijama kako bi se tehnikom spajanja proizveli spojevi spremni za daljnju mehaničku obradu u vrlo kratkom vremenskom roku. [21, 22]

Nakon završetka procesa zavarivanja, intersticijski dušik i ugljik započinju vlastitu preraspodjelu unutar feritne kristalne rešetke. Brzim hlađenjem čelika s temperature $A_1 = 723$ °C se dobiva kruta faza prezasićena dušikom sklona toplinskom starenju ili starenju poslije kaljenja, gdje se mijenjaju fizikalna i mehanička svojstva čelika. Povećava se vrijednost tvrdoće i čvrstoće ali zbog toga značajno pada duktilnost, a posebno zarezna žilavost zbog modifikacije površinskog sloja gdje zarezna djelovanja izazivaju nastanak pukotine. [21, 22]

Promjena fizikalnih i mehaničkih svojstava najviše ovisi o stupnju prezasićenja dušikom čija se količina za konstrukcijske čelike ograničava na 0,003 %, za SM čelik je ograničenje do 0,007 % dok je za čelike u trafo-kotlogradnji granica od 0,010 % do 0,015 %. Visokolegirani austenitni čelici u svojoj strukturi sadrže veće količine dušika (<0,03%) zbog toga što je dušik vrlo jak i lako topiv austenitotvorac. [21, 23]

Potpuno prezasićenje kristalne strukture dušikom se može postići zagrijavanjem čelika na temperaturu maksimalne topivosti dušika u kristalnoj rešetci pri 590 °C. Nakon zagrijavanja se radni komad naglo hladi u vodi čime se otopljeni dušik prisilno zadržava te se u takvom stanju ostavlja na dozrijevanje u trajanju do tri tjedna. [21, 23]

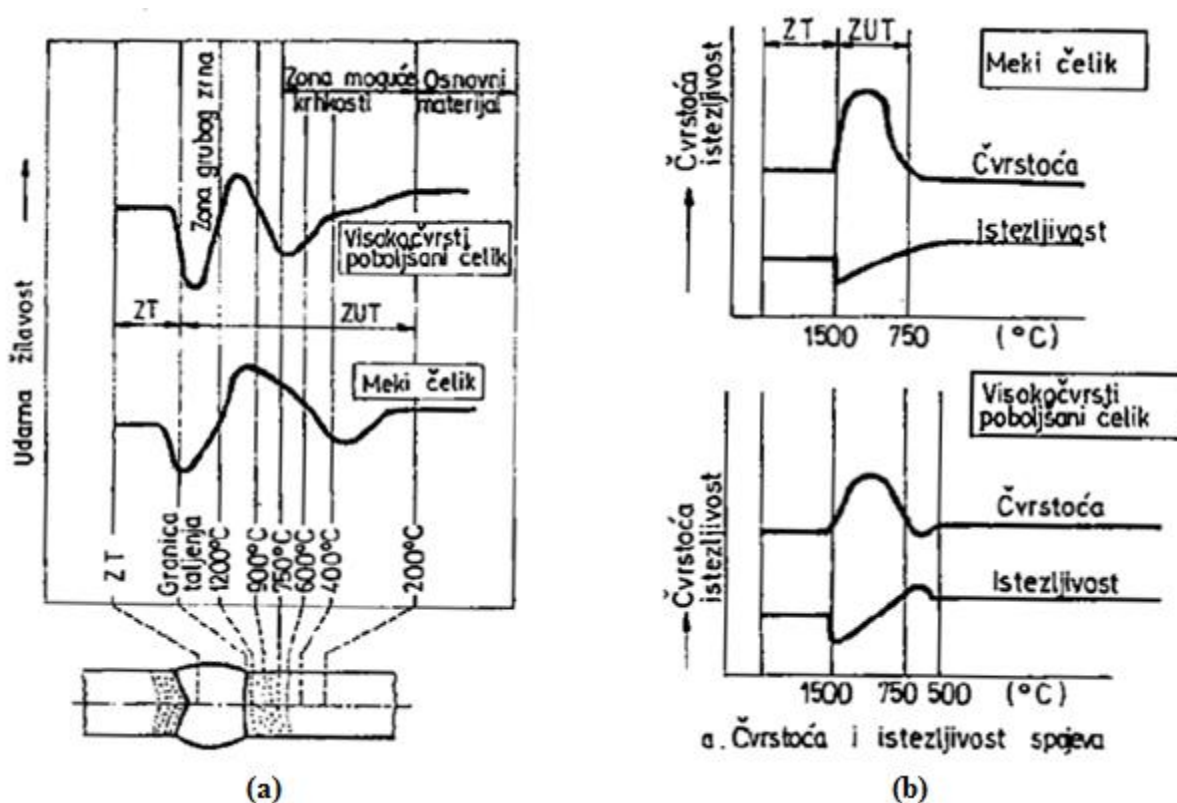
Pojavni oblici:



Slika 13. Utjecaj unosa topline na strukturu zavarenog spoja za ugljični čelik [12]

Područje gdje se javlja starenje materijala je zona materijala izložena temperaturama 400 °C i niže. Zbog toga što procesom hlađenja dolazi do plastične deformacije materijala, javlja se mogućnost da će prethodno hladno deformirani materijal biti podložan krhkosti izazvanoj starenjem. Kod takvih čelika, skloni procesu starenja unutar temperaturnog područja 200 °C – 400 °C će doći do pada udarne žilavosti. [12]

Na slikama prikazanim ispod, mogu se uočiti velike razlike u ponašanju mehaničkih svojstava prema zonama utjecaja topline. Meki čelici, odnosno obični konstrukcijski čelici bilježe značajan pad udarne žilavosti unutar temperaturnog područja 200 °C – 400 °C. [12]



Slika 14. Dijagrami udarne žilavosti, čvrstoće i istezljivost [12]

Na slici 14 (a) – dijagrami prikazuju ponašanje udarne žilavosti s obzirom na zone utjecaja topline, (b) – dijagrami prikazuju omjer čvrstoće i istezljivosti unutar zone utjecaja topline. [12]

2.4.3. Sklonost prema toplim pukotinama:

Karakteristike toplih pukotina:

Vruće pukotine su greške nastale tijekom hlađenja uslijed procesa zavarivanja, a rezultat je odvajanje metala zavara ili zone utjecaja topline po granicama kristala zbog nemogućnosti deformacije polu rastaljenog metala zavara tijekom hlađenja i skrućivanja. Kako bi vruće pukotine nastale, tijekom zavarivanja se moraju javiti dovoljne količine naprezanja i mikrostruktura podložna stvaranju pukotina. [9, 12, 34]

Pad temperature metala zavara ili zone utjecaja topline uvijek izaziva stvaranje zaostalih naprezanja koja zatim izazivaju određeni gradijent deformacije koja ovisi o mehaničkim svojstvima materijala. Ako je sposobnost deformacije materijal manja, tada se stvaraju nehomogenosti koje izazivaju pukotine jer one ne ovise o napreznjima već isključivo o sposobnosti deformacije. [34]

Sklonost metala zavara prema toplim pukotinama se može navesti klasificirati prema nizu utjecajnih parametara koji nikada nisu nezavisni jedni od drugih, ali se mogu grupirati unutar tri generalna pojma: koncentracije nečistoća, brzine deformacije i temperaturnog ciklusa. [6, 12]

U pravilu, tople pukotine nastaju kada sustav ima dvije različite kristalne faze, odnosno kada se na granicama kristalnih zrna nalazi nisko-taljiva faza nečistoća čija je sposobnost deformacije bitno različita od ostaka metala zavara. [6]

U rjeđim slučajevima je moguće da u monofaznom sustavu (austenitni čelik) pri zavarivanju, proces rekristalizacije biva zakočen poligonalnom kristalnom rešetkom koja nastaje deformacijom dislokacija uslijed visoke temperature. Dislokacije se gibaju i međusobno zbijaju zbog izuzetno visoke deformabilnosti austenitne kristale rešetke te je posljedica toga pojava velike količine mikro pukotina. [6]

Ocjena ispitivanja sklonosti prema toplim pukotinama:

Načini ispitivanja pukotina se mogu podijeliti na tri aspekta:

1. Ispitivanje upotrebom istih parametara zavarivanja provode se ispitivanja usporedbe različitih vrsta čelika i/ili dodatnih materijala te njihove interakcije s aspekta sklonosti prema pojavi toplih pukotina. [6, 36]
2. Ispitivanje upotrebom istog čelika i dodatnog materijala, ali promjenom seta parametara zavarivanja kojima se može dobiti uvid o pojavi toplih pukotina ovisno o vrijednosti specifičnog unosa topline. Zavareni spojevi izloženi manjem unosu topline su manje podložni nastanku toplih pukotina, što je ujedno i glavna karakteristika likvacijskih pukotina koje se javljaju unutar zone utjecaja topline. [6, 36]
3. Ispitivanje metalurških uzroka na pojavu toplih pukotina jer one spadaju u pukotine koje najviše ovise o kemijskom sastavu materijala. Veliki utjecaji također ima način proizvodnje čelika (dezoksidacija nečistoća). [6, 36]

Pojavni oblici toplih pukotina

Ovisno o mjestu nastanka, tople pukotine možemo podijeliti na:

1. Tople pukotine u metalu zavara – Kristalizacijske (solidifikacijske) pukotine
2. Tople pukotine u zoni utjecaja topline – Likvacijske pukotine i pukotine izazvane padom istezljivosti

Solidifikacijske pukotine:

Na pojavu kristalizacijskih pukotina najveći utjecaj imaju:

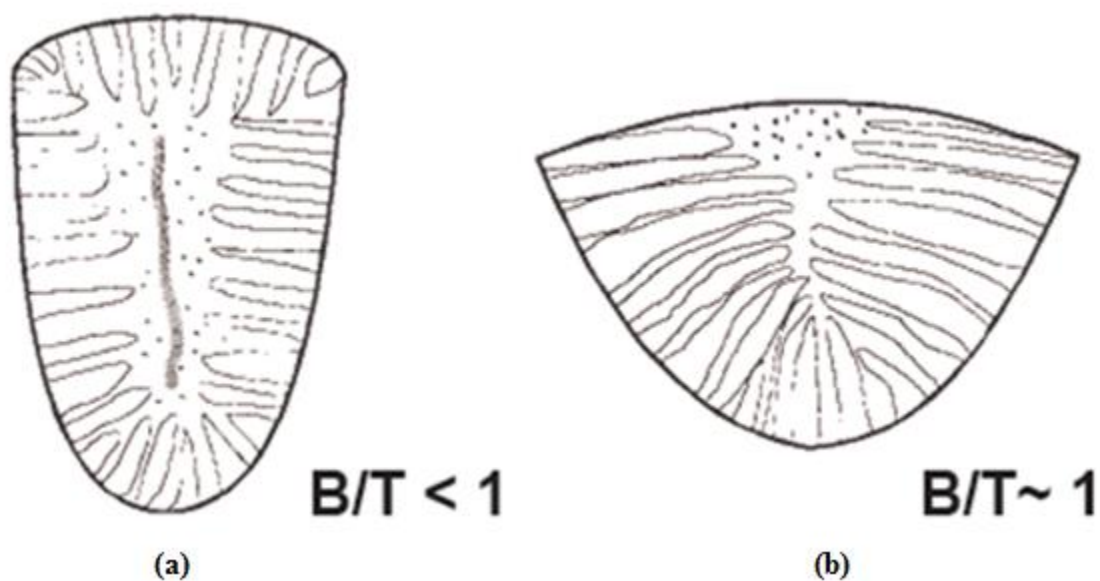
- Kemijski sastav – posebni utjecaj imaju nečistoće
- Krutost zavarenog spoja – utječe na deformabilnost
- Parametri zavarivanja – utječu na oblik zavarenog spoja
- Brzina zavarivanja – utječe na smjer kristalizacije dendritnih kristala

Solidifikacijske pukotine se pojavljuju pred kraj procesa hlađenja, te se mogu pojaviti u unutrašnjosti ili na površini zavarenog spoja. Bilo koji od pojava oblika ove vrste pukotina se javlja u interdendritnim šupljinama te su takvi oblici uvijek su okomiti na izoterme nastale unosom topline. [36]

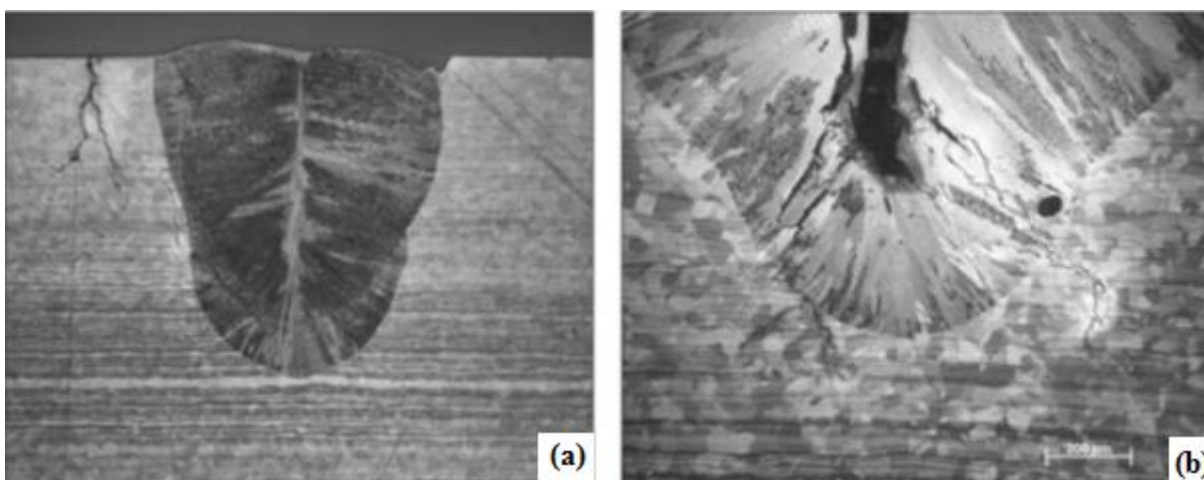
Solidifikacijske - kristalizacijske pukotine nastaju pri pothlađivanju taline, stezanja kristala-dendrita i potrebe da se nastajuće šupljine popune talinom niske viskoznosti. Zbog niskotaljivih faza - eutektika koje popunjavaju navedene šupljine i vlačnih naprezanja izazvanih stezanjem taline u procesu hlađenja dolazi do odvajanja to jest pukotine u zadnjoj fazi kristalizacije. [12]

S obzirom na to da se formiraju pri visokim temperaturama, oksidiraju u kontaktu s okolišnim zrakom te za razliku od hladnih pukotina, prijelomna je površina toplih pukotina uvijek crne/čadave površine. Uslijed kontrakcije odnosno stezanja okolnog metala tijekom hlađenja, u pravilu su izdužene i široke. Pukotine ove vrste su vrlo dugačke, malo razgranate i više otvorene te u velikoj mjeri ovise o kutu rasta dendritnih kristala i obliku kojim oni kristaliziraju.

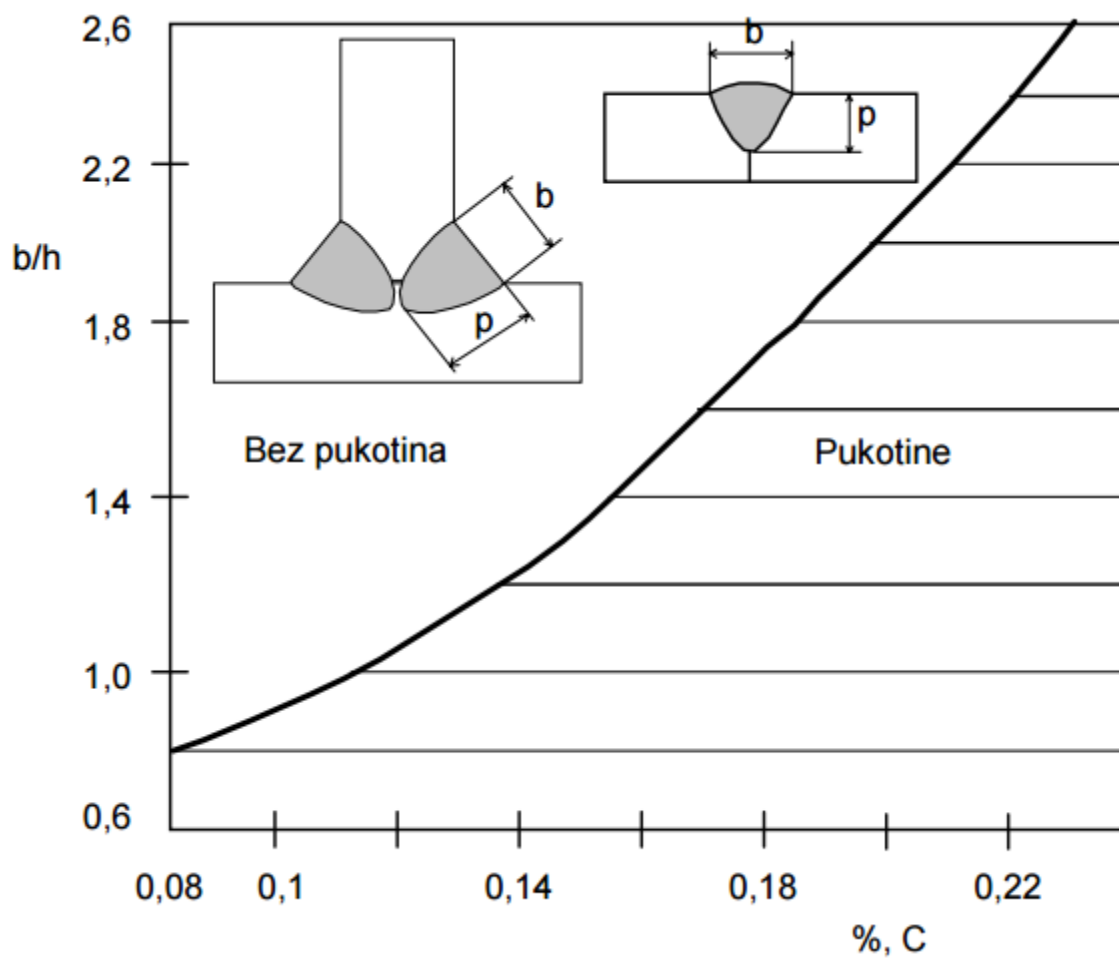
Veliki utjecaj na oblik i kut rast kristala utječe geometrija odnosno oblik i kut pripreme žlijeba zavarenog spoja. Pravilan omjer širine i visine zavarenog spoja je $B:T = 1:1$ – što znači da je idealan omjer jednaka visina i jednaka širina uz zadržavanje štitastog oblika zavora. Na slici 15 (a) se nalazi prikaz nepovoljne geometrije zavarenog spoja sklonog toplim pukotinama, (b) – prikaz povoljnije geometrije manje sklone stvaranju toplih pukotina. [12]



Slika 15. Geometrije zavarenog spoja sklone toplim pukotinama [36]



Slika 16. Makro izbrusci sa vidljivim toplim pukotinama [35]

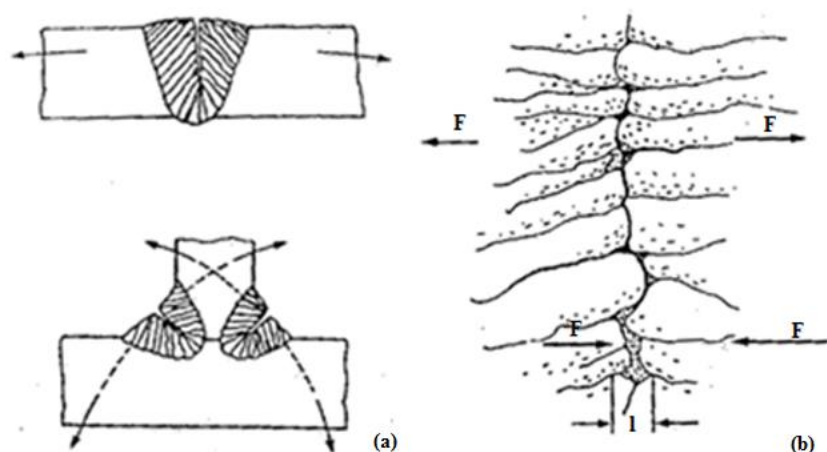


Slika 17. Dijagram utjecaja geometrije i udjela ugljika na stvaranje toplih pukotina [12]

Utjecaj nečistoća:

Za sprječavanje kristalizacijskih pukotina treba što više smanjiti udio nečistoća, a preostali dio nečistoća treba vezati u faze sa što višim talištem. Mangan se dodaje kako bi se spojio sa sumporom - MnS čije je talište $1610\text{ }^{\circ}\text{C}$ te se zbog toga prvi hladi i postaje klica kristalizacije. U slučaju da mangan nije dodan, sumpor teži stvaranju se željeznih sulfida FeS – eutektik niskog tališta čija je temperatura tališta $998\text{ }^{\circ}\text{C}$ koji se zbog toga zadnji skrućuju tijekom hlađenja zavarava i izazivaju tople pukotine. [6, 12]

Solidifikacijske pukotine zahtijevaju dva nužna preduvjeta za nastanak: pad istežljivosti uz vlačna naprezanja koja nastaju tijekom hlađenja te uvjeti uklještenja moraju biti nepovoljni kako bi se spriječilo slobodno stezanje i rastezanje osnovnog metala. Nečistoće koje stvaraju segregacije, kao što su sumpor, fosfor, kisik i oksidi se ne dodaju namjerno u zavareni spoj već se u njemu mogu pronaći isključivo kao prateći elementi iz nečistog osnovnog materijala ili kao posljedica neoptimalnih metalurških reakcija. [6, 12]



Slika 18. Shematski prikaz nastanka solidifikacijske pukotine [35]

Na slici 18 (a) – uslijed djelovanja naprezanja u zavarenom spoju, tijekom hlađenja se javljaju solidifikacijske pukotine, (b) – uvećani prikaz interkristalnog karaktera tople pukotine izazvane niskotaljivim fazama koncentriranim između granica kristala. [6, 12]

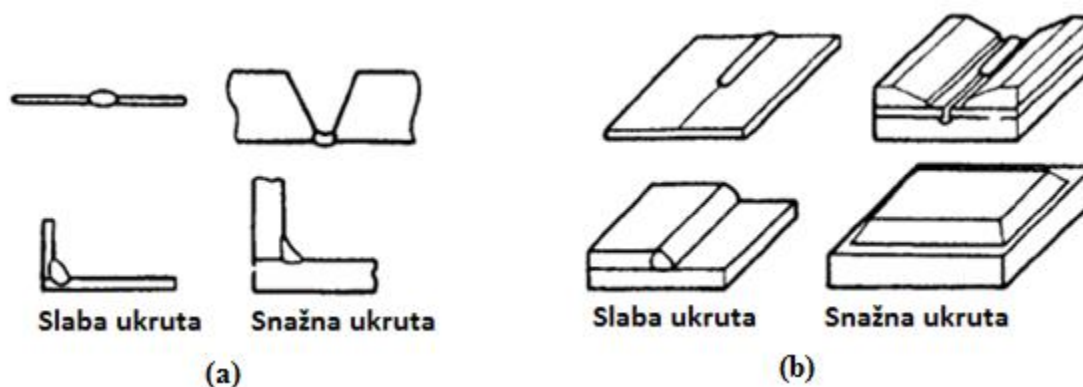
Utjecaj ukruta:

Stupanj povećanja naprezanja izazvanih kontrakcijom pada sa smanjenjem temperature te se može opisati formulom. [36]

$$\lambda = xE\alpha \quad [\text{GPa m K} / \text{mm}] \quad (2)$$

Parametri o kojima stupanj povećanja naprezanja ovisi su:

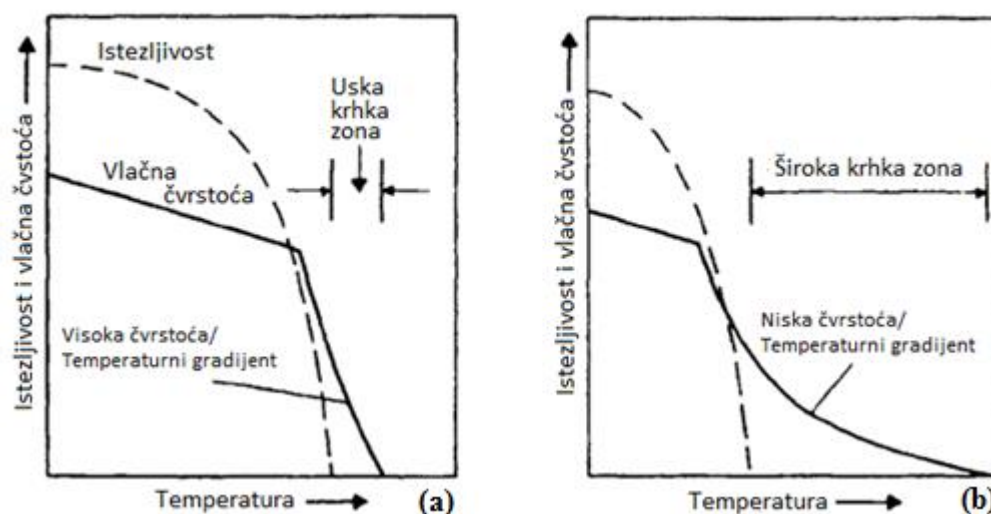
- E – Youngov modul elastičnosti [Gpa]
- α – koeficijent toplinske dilatacije [mm/mK]
- X – faktor uklještenja koji ovisi o:
 - Tipu zavarenog spoja
 - Krutosti zavarenog spoja
 - Zazoru između dva radna komada
 - Debljini osnovnog materijala
 - Odnosu debljina osnovnog i zavarenog metala



Slika 19. Shematski prikaz ukruta [37]

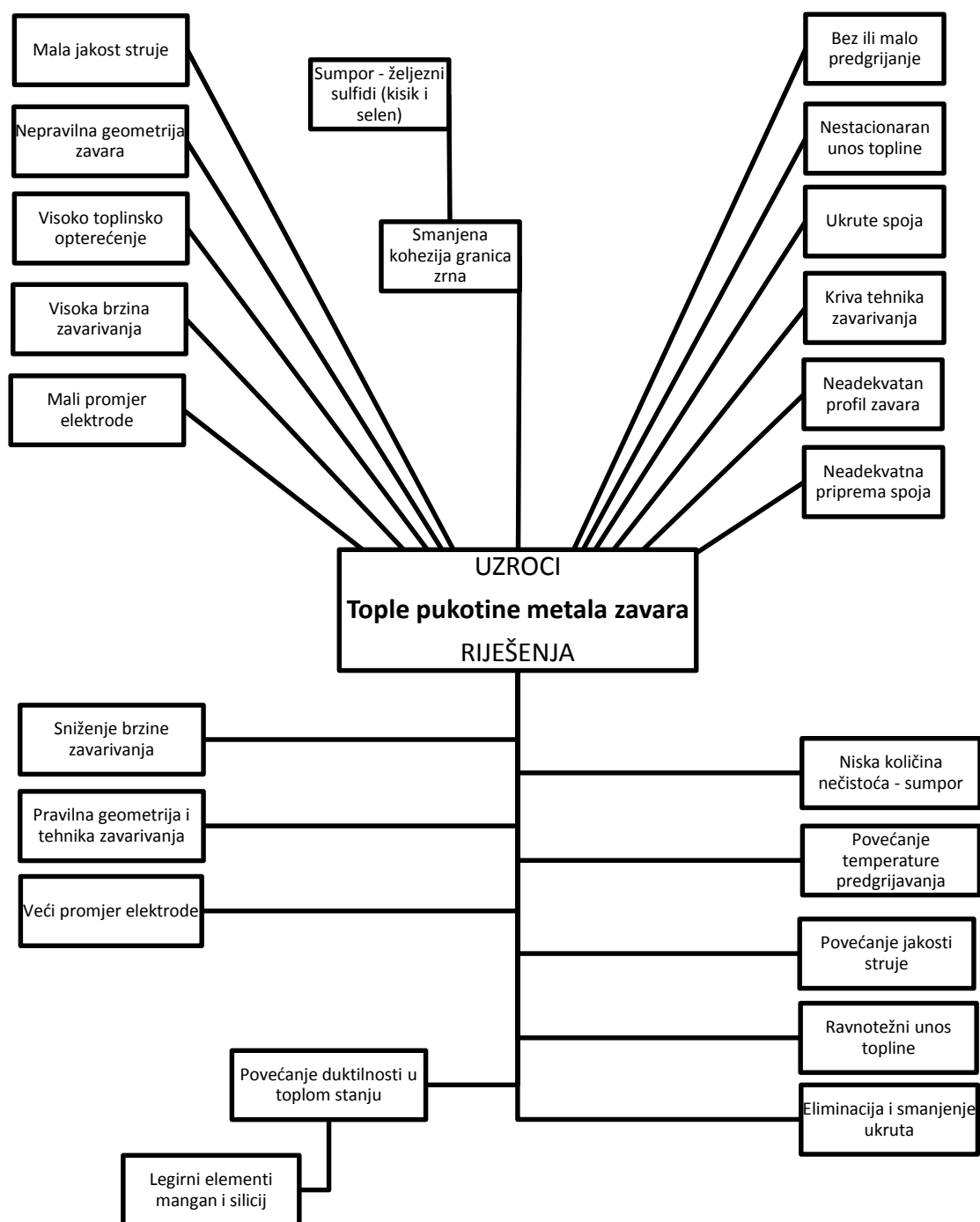
Slika 19 (a) – shematski prikazuje razliku između slabih i snažnih ukruta za kutni spoj, (b) shematski prikaz ukruta u pogledu izometrije. [37]

Uvjeti maksimalnog uklještenja se ostvaruju kada su dva radna komada uklještena unutar steznih naprava koje ne dopuštaju radijalno i aksijalno širenje i skupljanje materijala tijekom unosa topline. Vrsta zavarenog spoja i geometrija zavarenog spoja također utječu na uvjete uklještenja te se maksimalna krutost zavarenog spoja postiže korištenjem debelih limova i relativno malih zavara. Drugim riječima, relativan odnos debljine osnovnog i zavarenog metala mora biti što izraženiji, ali u korist osnovnog metala. [35, 36]



Slika 20. Dijagram ponašanja istezljivosti i vlačne čvrstoće u ovisnosti o temperaturi [37]

S povećanjem područja krhkosti se ujedno povećava mogućnost razvoja i negativnog utjecaja visokih naprezanja nastalim kontrakcijom materijala tijekom hlađenja. U takvim materijalim je krivulja porasta čvrstoće je nedovoljno velikog nagiba, a točka nulte istezljivosti nastupa prekasno kako bi se deformacijom zavarenog spoja kompenzirala naprezanja izazvana kontrakcijom. Tijekom hlađenja, temperatura taline pada ispod linije likvidus te krute faze kristala niču i rastu sve do određene temperature nakon koje se spajaju i formiraju koherentnu iako ne u potpunosti krutu masu. U tom trenutku se pri temperaturi koherencije, metal počinje dobivati mehanička svojstva. Najprije je formirani metal krhak i vrlo je niske istezljivosti, koja skokovito raste s padom temperature. Interval između temperature koherencije i temperature nulte istezljivosti se naziva područje krhkosti. Metali čije je područje krhkosti veće, također podliježu većem riziku nastanka toplih pukotina. [35, 36]



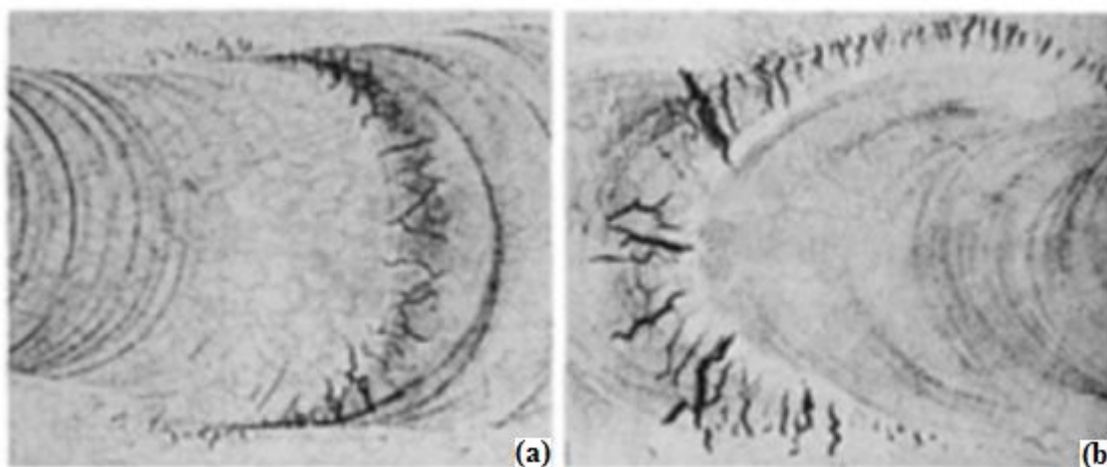
Slika 21. Utjecajni parametara na uzroke i rješenja nastanka toplih pukotina [37]

Likvacijske pukotine:

Likvacijske pukotine nastaju u zoni utjecaja topline, najčešće kao mreža interkristalnih pukotina čiji je mehanizam nastanka sličan kristalizacijskim pukotinama. Pukotine koje nastaju u ZUT-u se dijele u tri grupe:

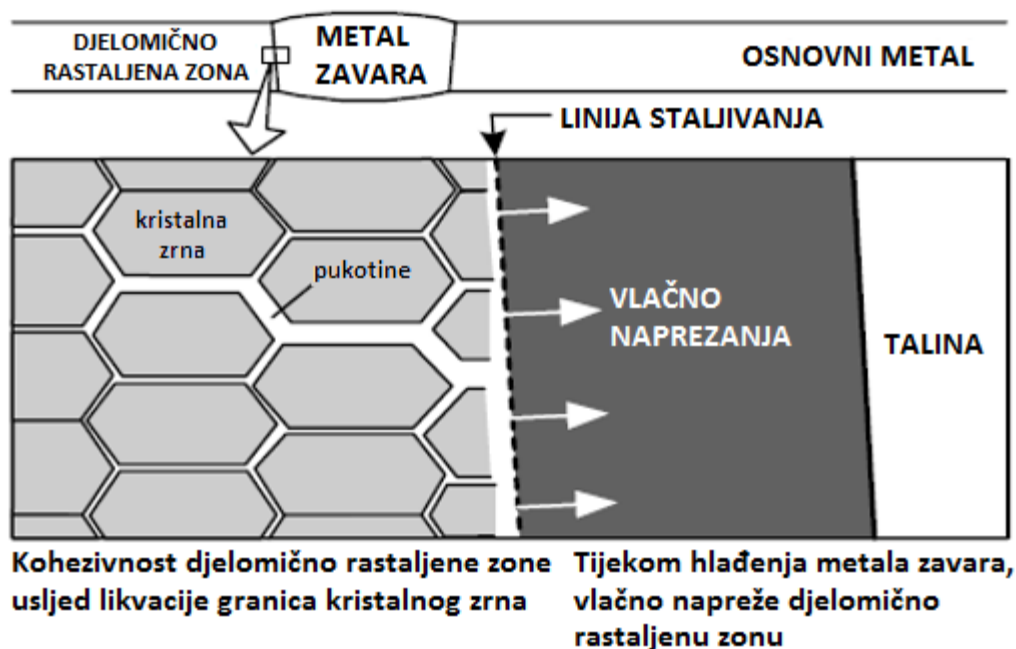
- Likvacijske pukotine
- Pukotine uslijed smanjenja izduženja
- Drugi mehanizmi

Konstruktivski čelici su najviše podložni likvacijskim pukotinama zbog toga što se isporučuju u valjanom stanju gdje se uključci i druge nečistoće raspoređuju po slojevima u pravcu valjanja. Temperatura taljenja sulfida se nalazi ispod temperature solidusa kristalne rešetke te su pri zavarivanju dio sulfida rastvara u ZUT-u i tako stvoren film nečistoća migrira u predjele između granica zrna. Sulfidni film smanjuje kohezijsku čvrstoću granica zrna koja pod djelovanjem naprezanja prilikom stezanja zavara izaziva mrežu mikro pukotina. [6, 12]

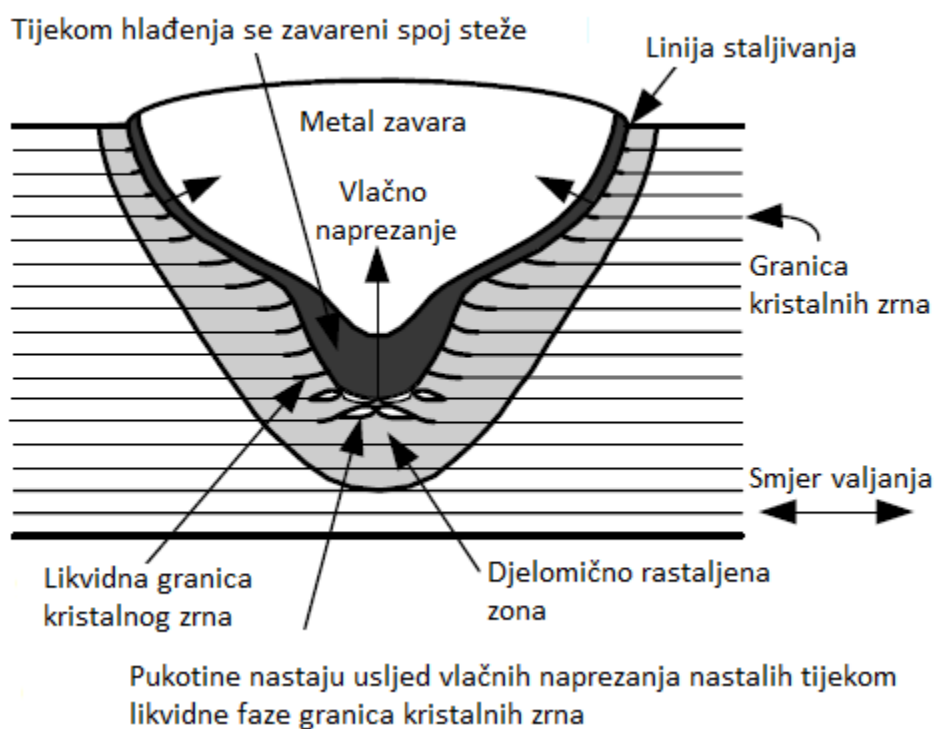


Slika 22. Likvacijske pukotine izazvane Varestraint ispitivanjem [35]

Na slici 22 (a) – prikaz likvacijskih pukotina nastalih tijekom zavarivanja s niskom unosom topline, (b) – likvacijske pukotine nastale tijekom zavarivanja s visokim unosom topline.

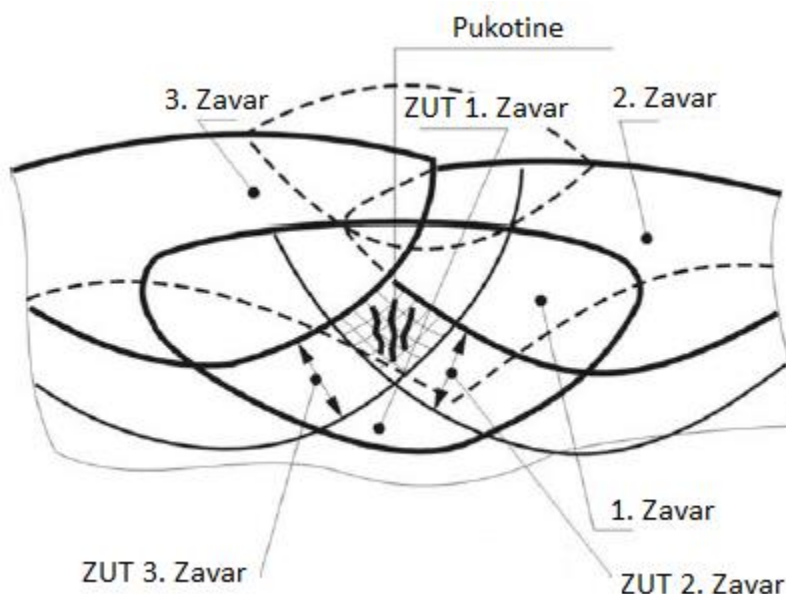


Slika 23. Ilustrativni prikaz interkristalnog djelovanja toplih pukotina [37]



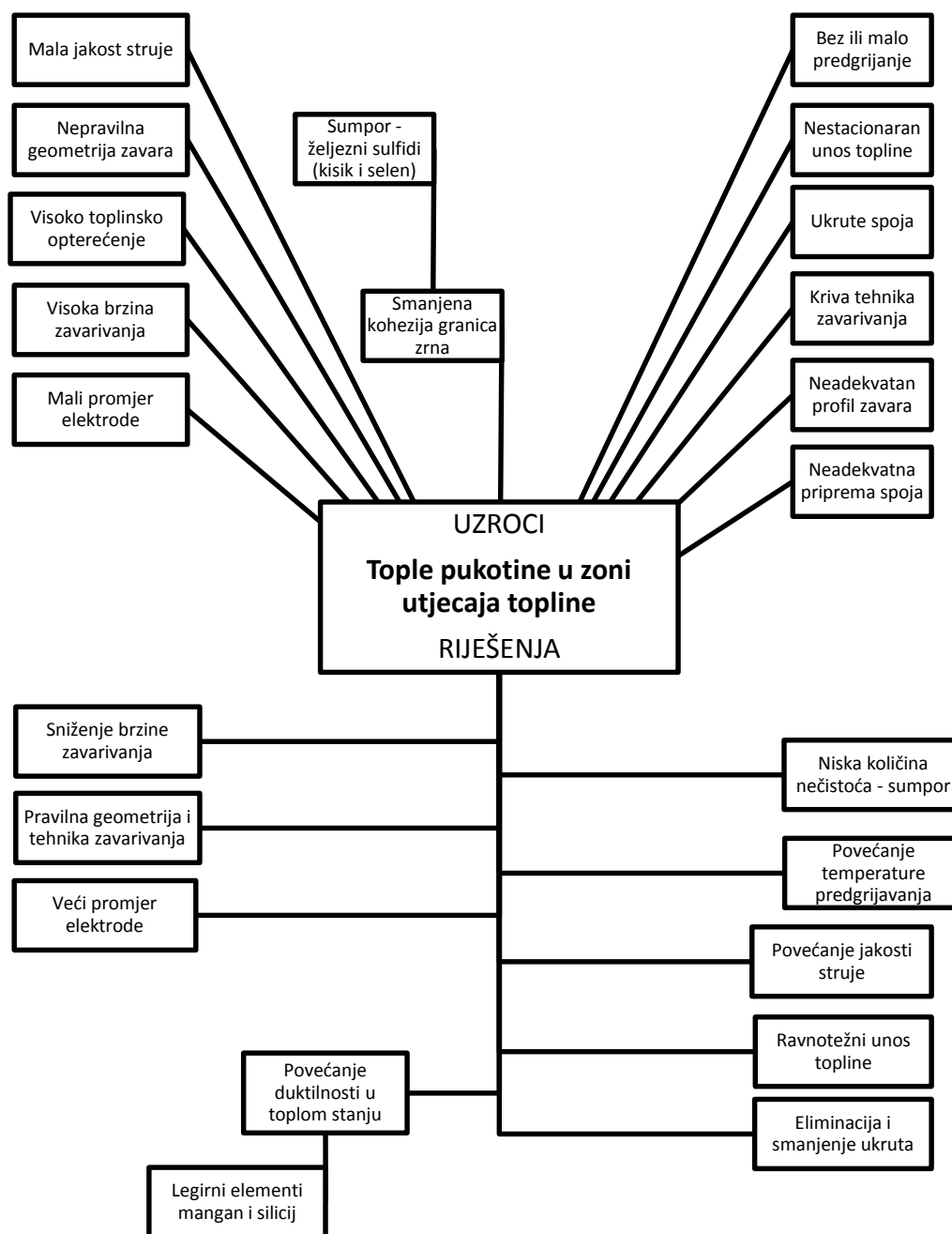
Slika 24. Prikaz raspodjele naprezanja i njihov utjecaj na stvaranje toplih pukotina [37]

Drugi mehanizam kojim se pukotine u zoni utjecaj topline mogu javiti je promjena svojstva izduženja prilikom zagrijavanja i ohlađivanja metala zavora. Vrijednosti izduženja konstrukcijskih čelika su za vrijeme zagrijavanja su veće nego za vrijeme hlađenja te se može uočiti pad izduženja u temperaturnom području od 1050 do 950 °C koji djeluje u spregu s mehanizmom gibanja dislokacija. S obzirom na to da se unutar tog temperaturnog polja niskotaljive faze sulfida stvrdnjavaju, može se zaključiti da je pad izduženja dodatni mehanizam koji utječe na izazivanje toplih pukotina. [12, 35]



Slika 26. Nastank likvacijskih pukotina kod višeslojnog zavarivanja [35]

Likvacijske pukotine imaju najveći potencijal za nastanak tijekom višeslojnog zavarivanja koje nastaju kao mikropukotine unutar zone utjecaja topline prijašnjih slojeva. Takve pukotine ne prijelaze preko linija staljivanja višestrukih zona taljenja te su njihove duljine najčešće zabilježene do 0.5 mm. Pretpostavka je da takve pukotine nastaju uslijed visoko-temperaturnog puzanja materijala uslijed temperaturom aktivirane relaksacije zaostalih naprezanja prijašnjih zavora. [36]



Slika 27. Shematski prikaz utjecajnih parametara na uzroke i rješenja nastanka likvacijskih toplih pukotina [37]

2.4.4. Temperatura tališta:

Karakteristike temperature tališta:

Temperatura tališta metala je temperatura na kojoj dolazi do prijelaska iz krutog u kapljevito stanje. Karakteristično temperaturno područje taljenja većine konstrukcijskih čelika je između 1500 °C i 1600 °C. Temperatura tališta je relativno ne osjetljiva na promjenu tlaka te je za razliku od vrelišta njezina vrijednost konstantna za pojedinu vrstu materijala. [27]

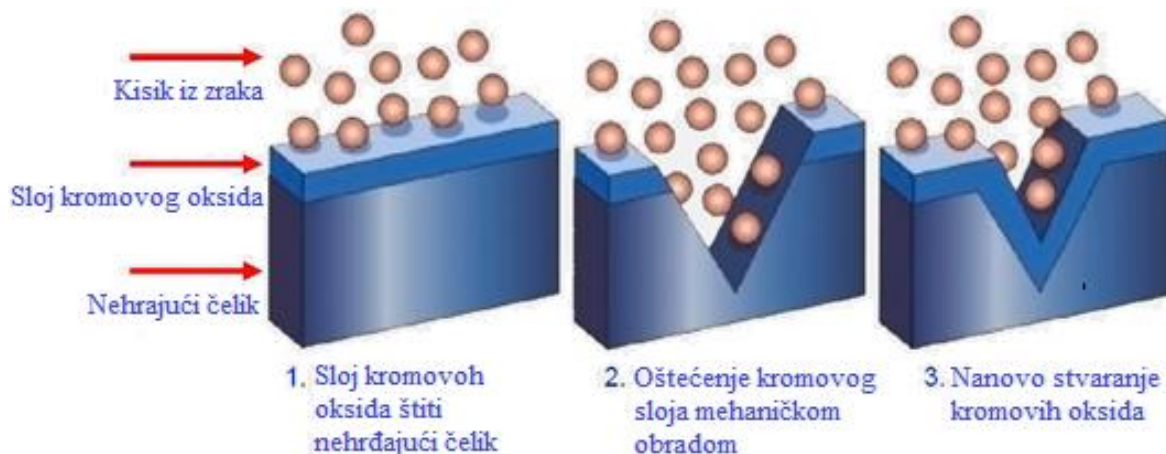
Proces zavarivanja obilježava vrlo intenzivan i nestacionaran unos topline što izaziva taljenje metala i oksidnih (zaštitih) slojeva koje je metal stvorio tijekom vremena. Kod većine čelika se najprije tali oksidni sloj te nakon toga i sam metal. Oksidni sloj zbog intenzivne temperature izgara i biva odstranjen iz metala zavarom kako se ne bi javili oksidni uključci i prskanje unutar samog metala zavarom. [6, 12]

Pojavni oblici oksidnih spojeva:

Problemi se javljaju kada je situacija obrnuta – ako je temperatura taljenja metala niža od temperature taljenja oksidnog sloja, javlja se bubrenje oksidnog sloja i zadržavanja rastaljenog metala unutar formirane „kože“ oksida uništavajući pritom osnovni materijal. Kožica oksida se uključuje u zavareni spoj kao nemetalni uključak. Za uspješno zavarivanje potrebno je odstraniti ili razoriti oksidnu kožicu prije početka i za zavarivanja djelovanjem električnog luka u inertnoj atmosferi (elektroda na "+" polu), prašcima za zavarivanje pri plinskom zavarivanju i lemljenju, kemijskim nagrivanjem površine osnovnog i dodatnog materijala ili mehaničkim odstranjivanjem. Kod elektrotopnog zavarivanja deblji sloj oksida se ujedno ponaša kao i izolator, pa je potrebno posebno čišćenje takvog sloja. Deblji slojevi se javlja pri toplinskim obradama. [6, 12]

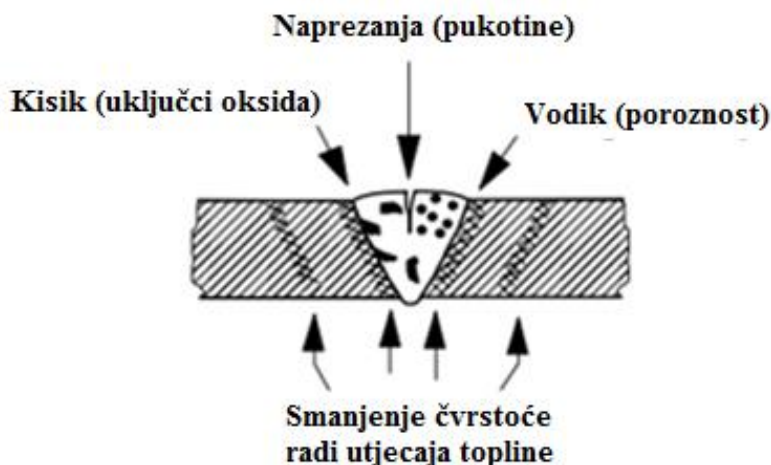
Kao primjeri mogu poslužiti oksidni slojevi koji uzrokuju imunost metala na korozijske procese, a najznačajniji predstavnici su aluminijev i kromov oksid.

Kromovi oksid ima temperaturu taljenja 1972 °C, pa je potrebno osigurati zaštitu kapljica metala unutar električnog luka i kupke kao i korijenske strane zavora. Također se koriste sredstva za odstranjivanje kromovih oksida s površine. Fluoridi su najefikasniji dodaci u oblozi elektrode za odstranjivanje kromovih oksida. Ostatke troske s fluoridima treba brižljivo odstraniti jer mogu djelovati korozijski na metal pri povišenim temperaturama, kao primjer pri naknadnoj toplinskoj obradi. [6, 12]



Slika 28. Kromovi oksida na površini nehrđajućeg čelika [38]

Al_2O_3 prirodna oksidna kožica na hladnom materijalu je debljine oko 0,01 mm. Daje pasivnu otpornost prema općoj koriziji. Aluminij oksid Al_2O_3 ima visoku temperaturu taljenja (2050 °C) i stvara poteškoće pri zavarivanju. Sam Al_2O_3 je bezbojan i vrlo tvrd te se u prirodi javlja kao obojeni film zbog prisustva drugih metala, a također se u malim količinama može pojaviti kao rubin, safir, korund ili glinica. Al_2O_3 u pojavnom obliku poput troske ima visoku specifičnu težinu od 3.2 g/cm³ te zbog toga često ulazi u talinu i ostaje zarobljen kao nepoželjan uključak. Pri visokim temperaturama tijekom toplinske obrade ili zavarivanja aluminija, stvara se na površini deblji sloj oksida kao i na samim rastaljenim kapljicama metala tijekom leta te je ostvarivanje homogenog zavarenog spoj zbog uključaka oksida vrlo komplicirano. [6, 12]



Slika 29. Najčešće greške zavarenog spoja na aluminijskim materijalima [12]

2.4.5. Temperatura vrelišta:

Temperatura vrelišta ili temperatura izgaranja je točka u kojoj metal u krutom stanju prelazi u plinovito stanje bez prelaska u kapljevito te se taj proces naziva sublimacija. Pojedini legirni elementi niskog vrelišta poput cinka (907 °C) i magnezija (1091 °C) tijekom zavarivanja intenzivno izgaraju u stupu plazme električnog luka i uzrokuju nastanak cinkovih i magnezijevih para koje u potpunosti ispunjavaju prostor te narušavaju prijenos metala. Osim utjecaja na sam prijenos metala, javlja se pojava „kipljenja“ i „prskanja“ metala zavara što rezultira kontinuiranim porama i nepotpunim staljivanjem popraćene intenzivnim prskanjem. [27]

Postupci zavarivanja prikladni za spajanje legura s udjelima cinka ili magnezija su modificirani MIG/MAG postupci koji se temelje na prijenosu „hladnih“ rastaljenih kapljica metala čime se dobiva lemljenje cinka i zavarivanje čelika odjednom. [6, 12]

2.5. Metalurška zavarljivost - metalurška svojstva:

2.5.1. Mikro i makro segregacije:

Karakteristike segregacija:

Segregacija je separacija nečistoća od ostalih korisnih legiranih elemenata u različite zone ohlađenog metala zavara. Segregacije općenito govoreći su uzrokovane odbijanjem prezasićene krute faze u drugu - odnosno tekuću fazu. Kao primjer u zavarivanju mogu poslužiti niskotaljive sulfidne faze koje bivaju izbačene iz krute kristalne rešetke zavarenog spoja u još vruću talinu u tekućem stanju. [39, 40, 41]

Mikro segregacije su nepravilnosti relativno govoreći malih veličina koje nastaju unutar prostora između dvaju dendritnih kristalnih zrna. Ova pojava se odvija kada se najprije skrutnjuje faza s nižim udjelom ugljika od ravnotežnog, te zbog toga stvara sekundarna faza prezasićena atomima ugljika. Kao primjer može služiti nastanak feritno perlitne strukture gdje je perlitna faza zapravo cementit – prezasićena faza atomima ugljika. [39, 40, 41]

Pojavni oblici segregacija:

Prva faza je nastanak mnogobrojnih klica nukleacije na samim rubovima taline gdje graniči s osnovnim materijalom. Razlog zbog kojeg nukleacija započinje baš na tim lokacijama je velika temperaturna razlika između „hladnijeg“ osnovnog materijala i „toplijeg“ dodatnog materijala. Inicijalna kristalna zrna su zbog toga vrlo sitna i heterogene strukture što znači da je nastao novi metal zavara koji se sastoji od pomiješanog osnovnog i dodatnog materijala. Usmjerenje sitnih zrna je kaotično i nasumično jer u ovoj fazi, temperaturni gradijent hlađenja nema glavnu ulogu u diktiranju smjera i oblika rasta kristalnih zrna. Samo pojedina veća zrna imaju tendenciju rasta prema sredini taline u smjeru maksimalnog temperaturnog gradijenta te se u tom trenutku stvara dendritna mikrostruktura. [40,42]

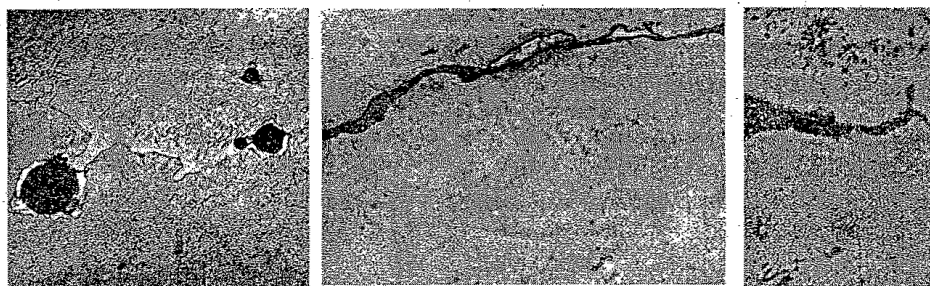
Druga faza je rast kristalnih zrna usmjeren u smjeru maksimalnog temperaturnog gradijenta te ova vrsta kristalnih zrna raste brže nego bilo koja druga vrsta. Nastala mikrostruktura je razgranata dendritna koja se širi prema sredini zavarenog spoja i ispred sebe „gura“ niskotaljive faze odnosno oblike nečistoća koje se izlučuju u sredini zavarenog spoja. [40, 42]

Treća faza je nastanak ekvijaksialnih kristalnih zrna na sredini zavarenog spoja koji je u pravilu heterogena sitnozrnata mikrostruktura povoljna za suzbijanje efekata koje izazivaju mikro i makro segregacije također izlučene i kristalizirane u ovom području. [40, 42]

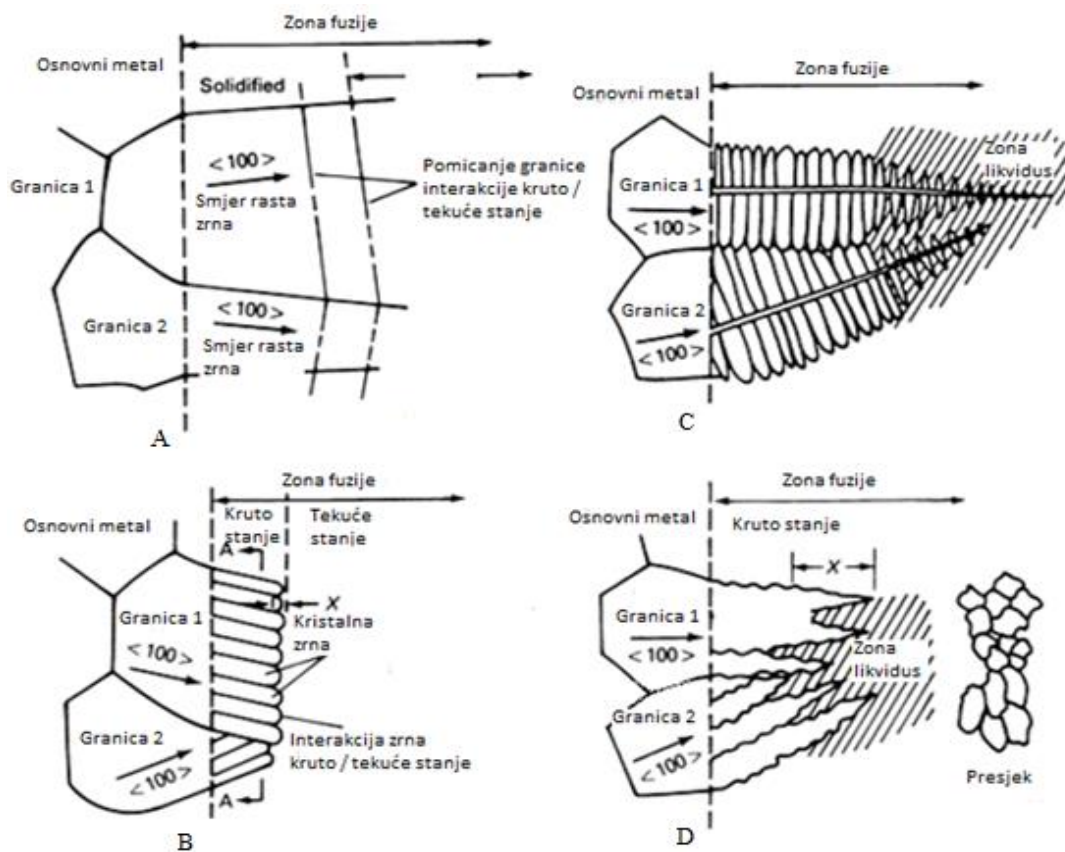
Makro segregacije se javljaju u veličini sličnoj veličini kristalnih zrna nastalih tijekom hlađenja metala zavora. Ovakva pojava može biti uzrokovana velikim brojem faktora koji utječu na gustoću fluida tijekom pretvorbe u krutu fazu. Ujedno su to uključci nastali kao reakcije zaštitnih i reakcijskih plinova sa rastaljenom kupkom metala te su to najčešće uključci troske ili pore. Nepravilno i nepotupno uklanjanje troske tijekom višeslojnog zavarivanja rezultira navedenim uključcima, dok se poroznosti stvaraju uslijed nepravilne tehnike rada i neadekvatnog vođenja električnog luka. [39]

Poželjno je onemogućiti nastanak bilo kakvih makrov segregacija tijekom zavarivanja jer one direktno utječu na pojavu toplih pukotina i bitno snižavaju mehanička svojstva zavarenog spoja. Uklanjanje makro segregacija se postiže osiguravanjem čistoće osnovnog materijala, higijenom procesa zavarivanja te homogenizacijskim žarenjem pri visokim temperaturama. [43]

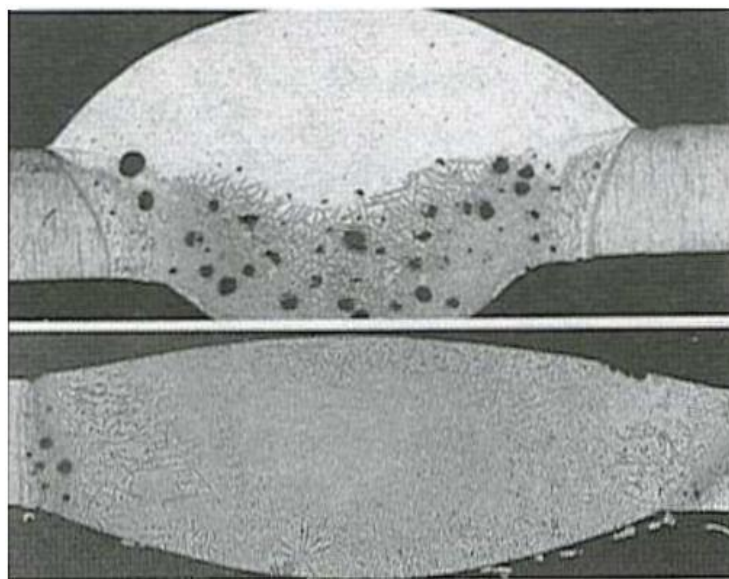
Na slikama ispod dan je shematski prikaz rasta kristalnih zrna te odnosa krute i tekuće faze tijekom nastanka mikrostrukture. Slika (A) prikazuje planarni/plošni rast, slika (B) prikazuje ćelijasti rast, slika (C) prikazuje ćelijast rast po dendritnim kristalima, slika (D) prikazuje stupasti rast kristalnih zrna. [34]



Slika 30. Makro prikaz interkristalnih uključaka u metalu zavora: 1 – silikantni, 2 – fosfidni, 3 – sulfidni uključci [5]



Slika 31. Grupa slika prikazuje različite mehanizme rasta kristalnih zrna [34]



Slika 32. Makrosegregacije nastale uključcima zaštitne obloge [39]

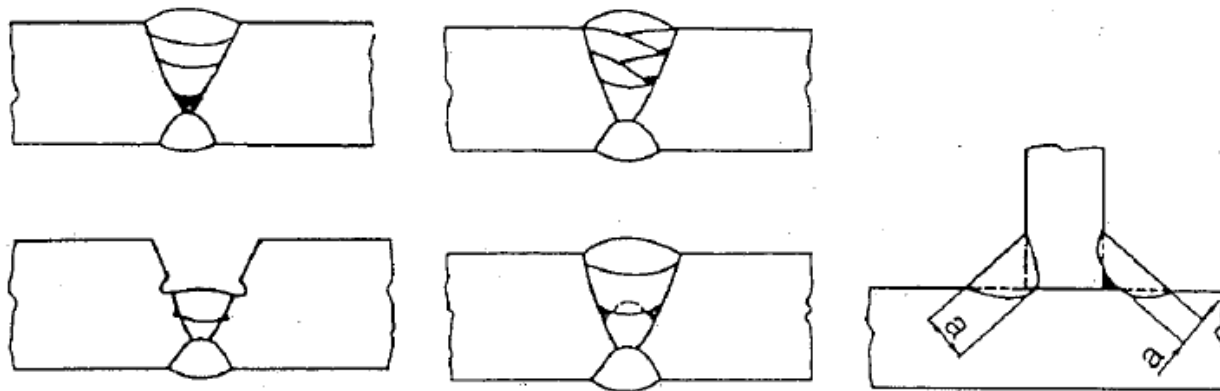
2.5.2. Uključci nečistoća:

Karakteristike uključaka nečistoća:

Uključenje ne željinih nečistoća odnosno krutih čestica najviše utječe na smanjenje čvrstoće i otpornosti na udarce. Takve nesavršenosti se razvijaju uključcima krutih čestica poput troske, zaštitnog praška, neizgorene obloge, strani metal ili uključci oksida i oksidnih spojeva. [5, 6, 43]

Pojavni oblici mogu biti mjestimični i pojedinačni ili sakupljeni unutar lokaliteta. Oblik uključka se može kategorizirati kao linearan i oštih bridova ili kao kuglast koji se tretira kao pora zbog umanjenog utjecaja na čvrstoću zavara. Najčešći uzroci su defekti nastali tijekom proizvodnje dodatnih materijala, nepažnja i nesavjestan rad zavarivača, neadekvatna tehnika zavarivanja te kontaminacija kupke rastaljenog metala onečišćenim zaštinim plinom. [5, 6, 43]

Mogućnosti nastanka se povećavaju korištenjem višeslojnog zavarivanja u trenucima kada se troska između prolazaka ne očiste do kraja.



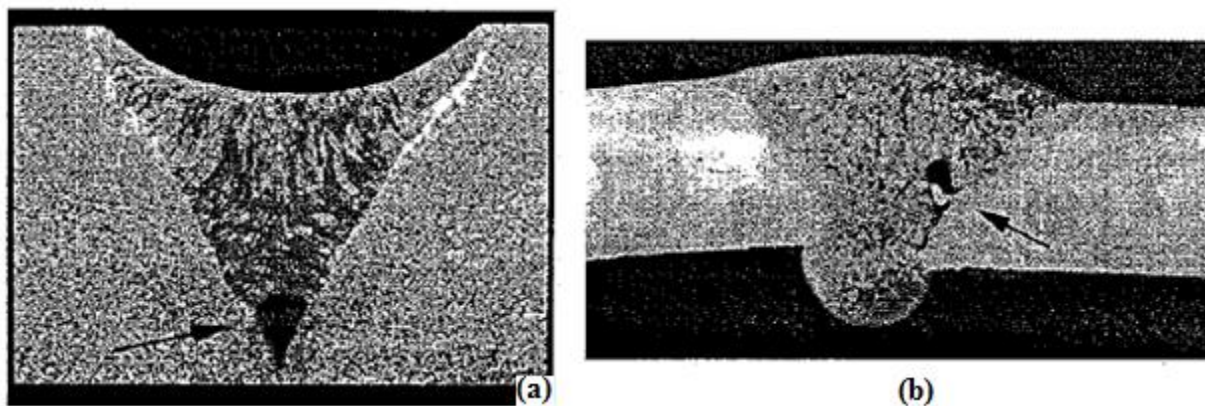
Slika 33. Shematski prikaz lokacija nastanka uključaka troske ili praška u zavarenom spoju [5]

Uključci obloge ili praška:

Nastanak ove vrste uključka se javlja kada taljenje obloge ili praška nije potpuno i ostane kao uključak unutar metala zavara, najčešće u EPP i MAG – praškom punjenom žicom postupcima zavarivanja. Glavni razlozi su defekti samih dodatnih materijala poput oštećenja obloge elektrode ili oksidirani prašak unutar praškom punjene žice ili zaštitnog praška. Osim dodatnog materijala, parametri procesa zavarivanja: jakost struje, napon struje, dužina električnog luka i gustoća snage također mogu izazvati nastanak uključaka. Kako bi se efekt nastanka umanjio, zavarivač mora koristiti pravilno skladišten dodatni materijal i pravilnom tehnikom, pravilnim parametrima ostvariti pravilnu geometriju zavarenog spoja. [5, 6, 43]

Uključci troske:

Uključak troske je najčešće linearnog oblika zbog toga što nastaje u smjeru pružanja metala zavara te se može vrlo jednostavno otkriti radiografskim ispitivanjem. Troska je produkt dezoksidacije metala zavara pomoću obloge elektrode ili zaštitnog praška tijekom procesa zavarivanja te se nužno mora temeljito i ispravno ukloniti. [5, 6, 43]



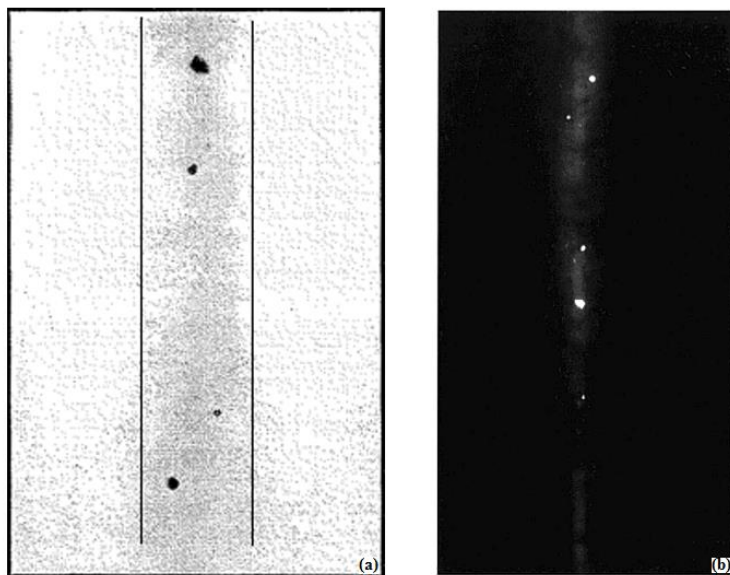
Slika 34. Uključak troske u zavarenom spoju [5]

Na slici 34 (a) – može se uočiti uključak troske zaostao nakon izrade korijenskog prolaza, (b) – uključak troske zaostao nakon izrade zavora popuna. [5]

Višeslojnim zavarivanjem s prekidima povećava se mogućnost nastanka šupljina koje troska popunjava. Osim samih šupljina, gruba površina prijašnjih zavora također može biti uzrok nastanka šupljina unutar kojih se troska tijekom zavarivanja gomila. Krivom tehnikom zavarivanja i pod krivim kutem može izazvati nepravilnosti u ponašanju karakteristike električnog luka. Kako bi se takav efekt spriječio zavarivačko osoblje mora osigurati pravilno održavanje dodatnog materijala. Osim toga, pravilan odabir parametara za zavarivanje je ključan kako bi se ostvarila glatka površina zavora i kvalitetan spoj s potpunim protaljivanjem. [5, 6, 43]

Metalni uključci:

Apsorpcija metala se najčešće javlja tijekom TIG postupka zavarivanja gdje se vršak elektrode može otkinuti i ostati zarobljen unutar metala zavora uslijed nepažnje zavarivača i krive tehnike zavarivanja. Na radiogramima takvi uključci su blještavo svijetli, a s obzirom na to da je gustoća volframa znatno viša od gustoće čelika, rentgenske će zrake biti odbijene od takvih uključaka. Osim volframa, uključci poput bakra se također mogu pronaći u zavaru ako se koriste bakrene podloške, a parametri zavarivanja ne budu prikladni. [5, 6, 43]



Slika 35. Radiogrami sa prikazima uključaka volframa [5]

Na slici 35 (a) – prikaz negativa radiograma s zacrnjenjima koje predstavljaju volframove uključke, (b) – stvarni radiogram s osvjetljenjima koje predstavljaju volframove uključke. [5]

Oksidi uključci:

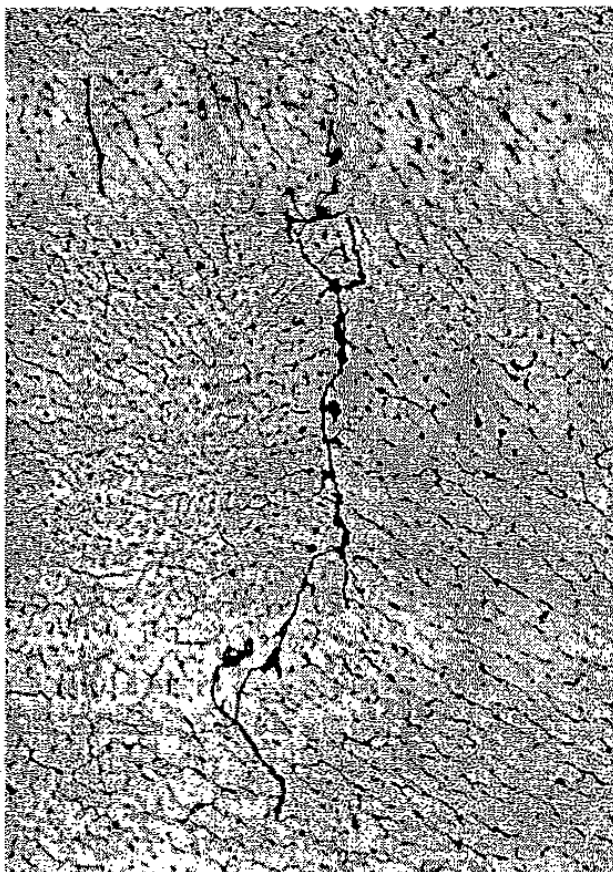
Uključenje oksidnih spojeva u metalu zavara je vrlo učestala pojava u slučaju zavarivanja aluminija i aluminijskih legura, a događa zbog neadekvatne tehnološke discipline procesa zavarivanja koja se sastoji od mehaničke pripreme rubova za zavarivanje, pravilnog odabira polova za zavarivanje, pripreme okoliša i uvjeta za zavarivanje te čuvanja i skladištenja dodatnog materijala. [5, 6, 43]

Tablica 5. Klasifikacija uključaka oksida prema vrsti nastanka [5]

NAZIV	OZNAKA	OPIS
	EN	
Čvrsti uključci	300	Čvrsti strani materijal kao uključak u materijalu zavara
Uljučak troske	301	Uljučak troske od obloge elektrode, troske od praška i žice, u metalu zavara:
	3011	- U nizu
	3012	- Pojedinačni
	3013	- Ostali
Uljučak praška	302	Ostatak praška može biti zarobljen u zavaru:
	3021	
	3022	
	3023	
Uljučak oksida	303	Metalni oksid kod skrućivanja ostao zarobljen u metalu zavara
Uljučak oksidne kože	3031	Uljučak oksidne kože ili filma metalnog oksida, najčešće kod zavarivanja aluminija i aluminijskih legura
Uljučak stranog metala	304	Uljučak stranog metala su zarobljeni komadići druge vrste metala u metalu zavara:
	3041	
	3042	
	3043	

Utjecaj uključaka troske je općenito da smanjuju čvrstoću zavarenog spoja zbog nehomogenosti kristalne rešetke i smanjenja nosivog presjeka zavora te zarezanog djelovanja koje izaziva lokalna troosna stanja naprezanja. Utjecaj na čvrstoću zavarenog spoja ovisi o količini, obliku i veličini uključaka. Uključci oštih rubova djeluju kao inicijatori pukotine, dok dugački uključci većih volumena smanjuju presjek zavora. Uključci manjih volumena i kuglastog oblika u manjoj količini nisu opasni već djeluju poput pora kuglastog oblika. [43]

Metalni uključci su uglavnom manjih dimenzija, a najčešći je uključak volframa kod TIG zavarivanja aluminija i aluminijskih legura te visokolegiranih nehrđajućih čelika. Izbjegavanje čvrstih uključaka u zavoru se postiže pravilnim oblikovanjem zavarenog spoja, ispravnom tehnikom zavarivanja i pravilnom tehnološkom disciplinom. [5, 6]

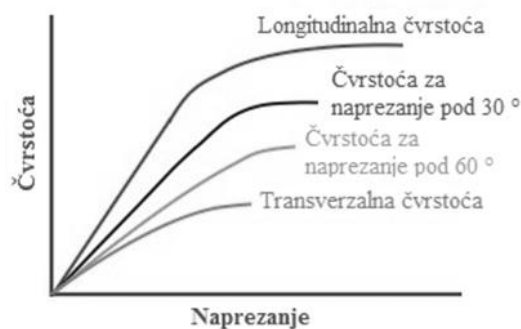


Slika 36. Prikaz uključka aluminijevog oksida [5]

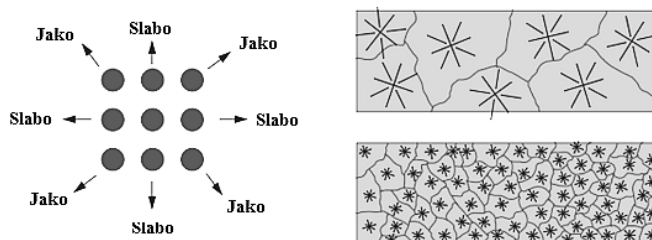
2.5.3. Anizotropnost mikrostrukture:

Anizotropnost u aspektu inženjerstva materijala te ujedno i zavarivanja je opće svojstvo materijala da neka od mehaničkih svojstava imaju zavisnost o smjeru pružanja kristalnih zrna. Većina materijala pokazuje anizotropno ponašanje te se kao primjer može uzeti Youngov modul elastičnosti koji ovisi o smjeru opterećenja na površini materijala i smjeru. Anizotropnost kristalnog materijala nastaje uslijed smjera rasta kristalnih zrna tijekom same proizvodnje, a može se očitati u razlici tekstura na površini čelika. [46, 47]

Čelici proizvedeni valjanjem zbog smjera pružanja zrna imaju bitno različita mehanička svojstva u longitudinalnom i transverzalnom smjeru pružanja. Materijali kao što su drvo i vlaknima ojačani kompoziti imaju vrlo anizotropnu strukturu koja se očituje znatno većom čvrstoćom i žilavosti u smjeru okomitom na smjer pružanja kristalnih zrna. Metali i legure su češće izotropni zbog homogenije mikrostrukture od organskih materijala, ali se tijekom lokalnog nestacionarnog unosa topline mogu javiti mjestimične pojave anizotropnosti što može imati negativan utjecaj na čvrstoću spoja. [46, 47]



Slika 37. Dijagram ovisnosti čvrstoće o naprezanjima - anizotropnosti materijala [48]



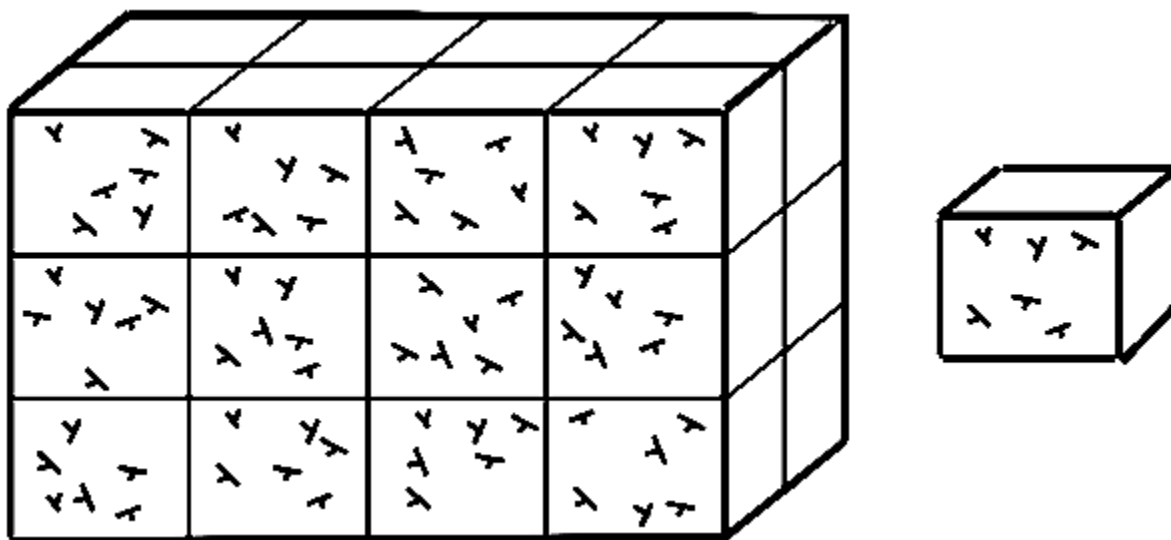
Slika 38. Raspodjela čvrstoće materijala u ovisnosti o izotropnosti materijala [49]

2.5.4. Veličina kristalnih zrna:

Karakteristike veličine kristalnih zrna:

Utjecaj veličine kristalnih zrna na mehanička svojstva materijala se najbolje opisuje Hall-Petch efektom. S obzirom na naprezanja i toplinsku energiju, dislokacije se mogu bez poteškoća kretati preko kristalnog zrna sve do granice kristala, pritom uzrokujući deformacije. Jednom kada dislokacije dosegnu granicu kristala, tamo trajno ostaju zarobljene. Manja kristalna zrna imaju veći omjer granice zrna i volumena materijala naspram većih kristalnih zrna, što dovodi do zaključka da će sitnozrnata mikrostruktura imati bolju sposobnost zaustavljanja gibanja dislokacija. Zaustavljanje dislokacija dovodi do efekta povećanja čvrstoće zbog toga što će mogućnost deformacije biti smanjena. [49, 50]

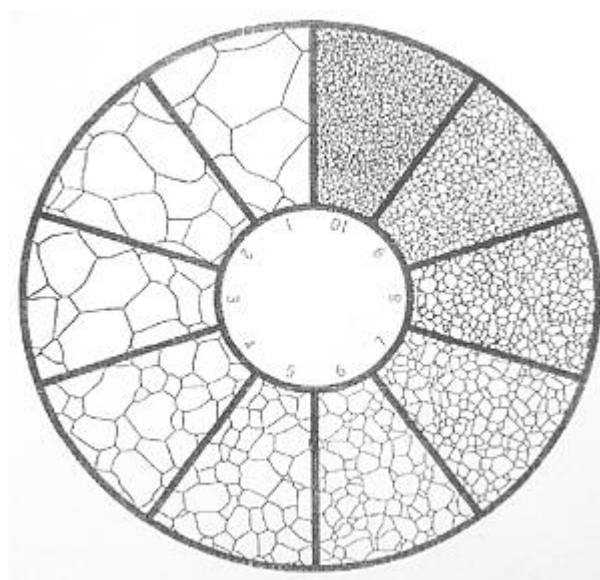
Osim što manja kristalna zrna zaustavljaju gibanje dislokacija, povećanje čvrstoće se također ostvaruje pomoću manipulacije kliznih ravnina. Svako kristalno zrno ima različite klizne ravnine po kojima se atomi u obliku dislokacija mogu olakšano kretati. Okomito na klizne ravnine, gibanje dislokacija je izuzetno otežano. Kristalna zrna tijekom proizvodnje imaju nasumično orijentirane klizne ravnine te se smatra da je za metalne materijale svojstvo čvrstoće upravo zbog navedenog efekta, ravnomjerno raspodijeljeno za sve presjeke. [51]



Slika 39. Ilustrativni prikaz odnosa između veličine kristalnih zrna i gustoće dislokacija [49]

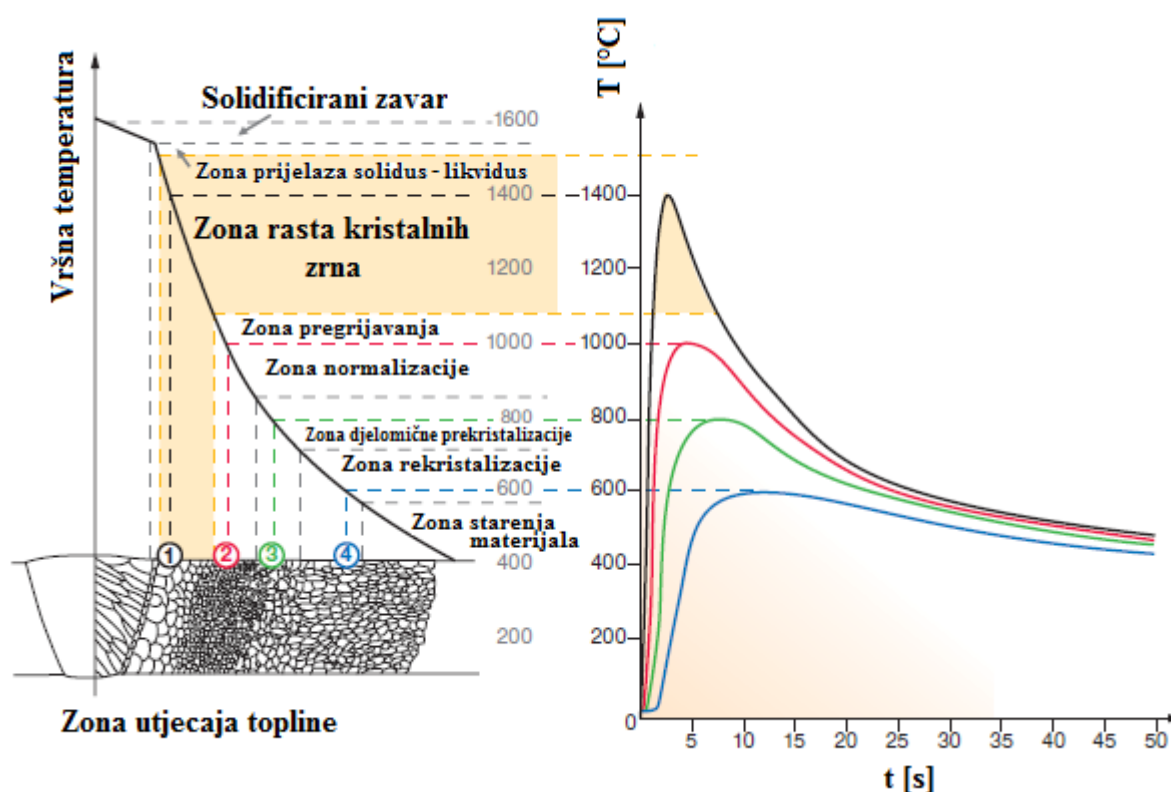
Mjerenje veličine kristalnih zrna:

Najzastupljenija vrsta mjerenja veličine kristalnih zrna je ASTM E112 metoda usporedbe kristalnih zrna s referentnima na etalonskom mjernom listiću. Mjerni etaloni variraju za različite vrste materijala i različite legure pojedine grupe čelika, kako bi vjerodostojnost rezultata bila u potpunosti osigurana. Metoda ispitivanja E 112 služi za mjerenje veličine kristalnih zrna ekvijaksnalnog oblika (ne deformiranog) kristalnog zrna te osim toga postoje smjernice za mjerenje veličine kristalnih zrna izduljenih procesom proizvodnje. Tijekom mjerenja se ispitni uzorak uspoređuje s etalonom prikazanim na slici 40 te se sva mjerenja i uspoređenja provode na optičkom mikroskopu uvećanja $\times 10$. [51]



Slika 40. Etalon za mjerenje veličine kristalnih zrna [51]

Proces zavarivanja predstavlja vremenski intenzivnu promjenu temperature (preko $1000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) te lokalno unošenje topline koncentriranim izvorom topline. Posljedica temperaturnih promjena kod zavarivanja je neujednačenost mikrostrukture presjeka zavarenog spoja uz prisustvo trajnih deformacija i zaostalih napetosti. Zbog značajnog utjecaja na promjene kemijskog sastava i strukture zone taljenja i zone utjecaja topline, očekuje se pogoršanje mehaničkih i antikorozijskih svojstava zavarenog spoja. [48, 49]



Slika 41. Dijagram utjecaja unosa topline na nastalu strukturu zavarenog spoja [51]

Kako bi se izračunao unos topline, koristi se formula:

$$Q = E = \frac{U \cdot I}{v} \cdot \eta \cdot \frac{60}{1000} \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (3)$$

$Q = E$ – unesena toplinska energija [J]

U – napon struje [V]

I – jakost struje [A]

v - brzina zavarivanja [m/s]

η – iskoristivost toplinskog izvora (0,6 – TIG, 0,8 – MAG, 1,0 EPP zavarivanje)

Zone promjene kristaln/sne strukture:

Zona utjecaja topline obuhvaća područje osnovnog metala u kojem do taljenja nije niti došlo, ali je ipak došlo do promjena mikrostrukture, mehaničkih i anti-korozivskih svojstava zbog neravnotežnog unosa topline. [49]

Promjene do kojih dolazi isključivo ovise o promjeni veličine i svojstava kristalnih zrna osnovnog materijala. Kod čelika se intenzivna promjena veličine kristalnih zrna očekuju iznad temperature 723 °C (A_{c1}), dok će za aluminijske materijale promjena veličine kristalnih zrna nastupiti iznad 120 °C. [49]

Zona taljenja:

Obuhvaća sve točke zavarenog spoja koje su bile iznad likvidus linije odnosno sve koje su pri zavarivanju bile u potpunosti rastaljene. Tijekom hlađenja dolazi do kristalizacije koja će dati strukturu različitu od strukture osnovnog materijala. Kristali obično rasu okomito na rubove i sučeljavaju se u sredini, stvarajući pritom zonu segregacija – nečistoća s nižom točkom tališta. Veličina kristalnih zrna uz liniju stajivanja je vrlo mala zbog epitaksijalnog rasta zrna, dok prema sredini zone taljenja se očekuje rast velikih kristalnih zrna u stubastoj formaciji. [12]

Zona pregrijavanja:

Nalazi se ispod točke solidusa i iznad temperature A_{c3} (1100 °C – 1150 °C) gdje dolazi do intenzivnog porasta to jest pogrubljenja kristalnih zrna austenita koja pri brzom hlađenju prelaze u feritno – perlitnu Wiedmannstättenovu strukturu, koja je generalno nepoželjna zbog visoke tvrdoće i čvrstoće te niske istezljivosti. [12]

Zona normalizacije:

Nalazi se neznatno iznad temperature A_{c3} te je njezina mikrostruktura obilježena sitnim zrnima, normalizirana i obično posjeduje bolja mehanička svojstva od osnovnog metala. Unutar ove zone dolazi do transformacije ferita i perlitna u austenit tijekom zavarivanja, dok tijekom se hlađenja javlja veliki broj klica nukleacija što rezultira stvaranjem sitnozrnate feritno – perlitne strukture. [12]

Zona djelomične prekrystalizacije:

U području gdje je temperatura materijala bila između 723 °C i 875 °C te se kao rezultat stvara feritno – perlitna struktura, gdje dominiraju velika kristalna zrna ferita te oko njih, manje kolonije feritno – perlitne sitnozrnate mikrostrukture. Mehanička svojstva su zbog ovakve disproporcionalne razlike veličina između zrna ferita i perlita značajno niža. [12]

Zona rekristalizacije:

Ispod temperaturnog područja oko 723 °C (A_{c1}) se feritno – perlitna struktura ovdje ne mijenja, ali dolazi do izlučivanja faza ili popuštanja kod poboljšanih čelika. Pojava koja se također odvija je pogrubljenje kristalnog zrna u slučaju da je osnovni materijal bio isporučen u hladno valjanom stanju. [12]

Zona starenja:

Ispod 400 °C može doći do starenja ako je osnovni materijal bio isporučen u hladno valjanom stanju ili je bio prije zavarivanja hladno deformiran. Tijekom zavarivanja se odvijaju hladne deformacije, pa starenje može izazvati krhkost. Kod čelika osjetljivih na starenje, između 200 °C – 400 °C može doći do značajnog pada udarne žilavosti. [12]

3. EKSPERIMENT

3.1. Uvod u eksperimentalni dio:

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada odabrano polje istraživanja je ispitivanje podložnosti osnovnog i dodatnog materijala na stvaranje toplih pukotina kako bi se procijenila zavarljivost materijala za zadane parametre pokusa.

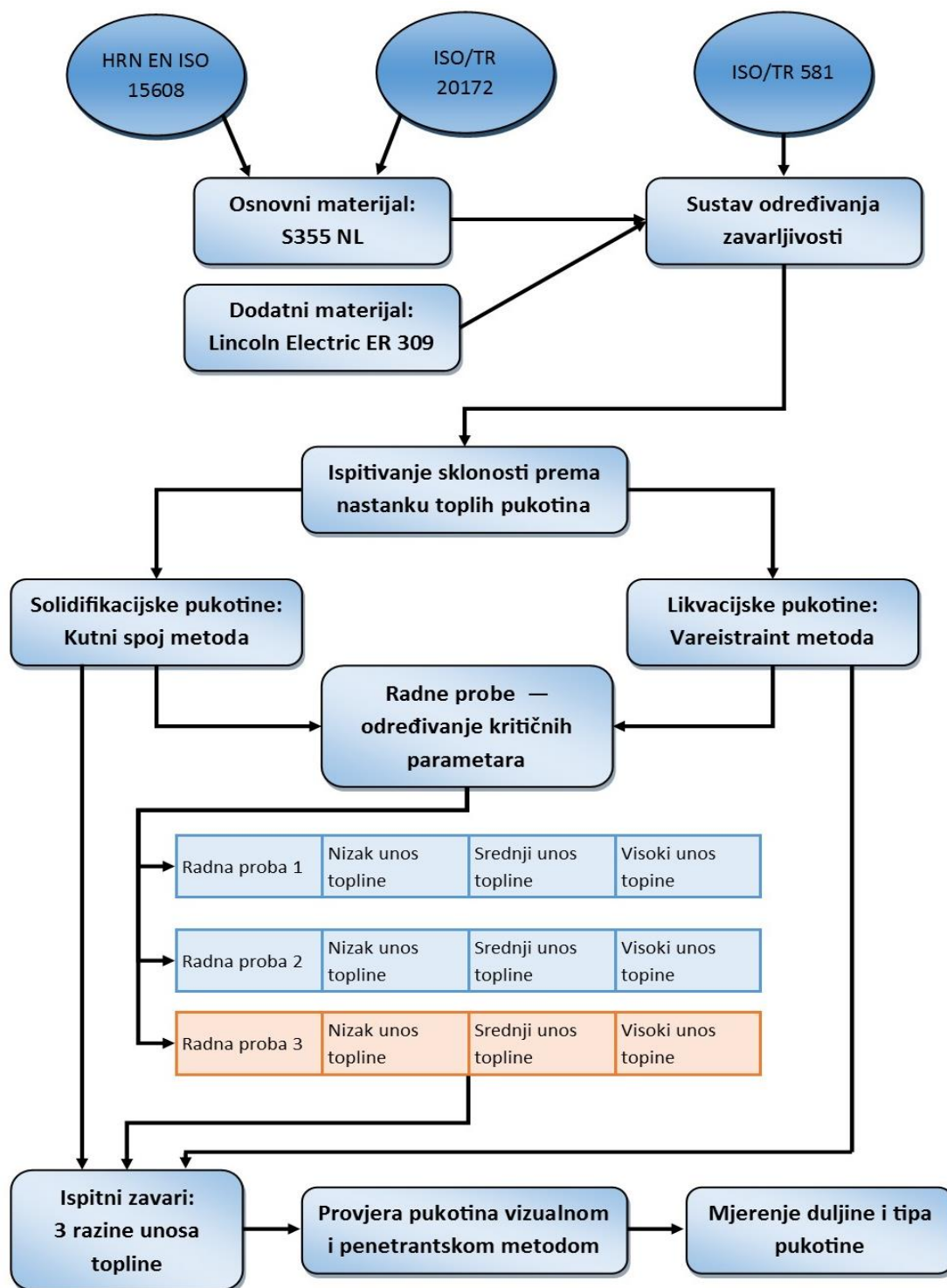
Prema normama prEN ISO 17641 -1, prEN ISO 17641 -2 i prEN ISO 17641 -3, definirane su razorne metode za ispitivanje podložnosti toplim pukotinama. U kombinaciji s normom TR ISO 581 kojom su definirane zavarljivosti materijala, odabrana ispitivanja u području toplih pukotina spada u kategoriju metalurške zavarljivosti te potkategoriju kemijski sastav. Prema normi prEN ISO 17641 -2, odabrana je prva metoda: ispitivanje samo-ukliještenih zavora, te je prema normi prEN ISO 17641 -3, odabrana druga metoda: ispitivanje vanjski-napregnutih zavora. [67]

Varijanta pokusa odabrana za prvu metodu: samo-ukliješten zavar je T spoj odnosno kutni spoj uz ispitivanje pucanjem s ciljem stvaranja solidifikacijskih pukotina. Dobiveni podaci i rezultat se može izraziti kvalitativno kao ocjena zavarljivosti dodatnog materijala.

Varijanta pokusa odabrana za drugu metodu: vanjski-napregnut zavar je V restraint metoda (eng. Variable restraint method) s ciljem stvaranja solidifikacijskih i likvacijskih pukotina pomoću kojih se može napisati kvantitativan iskaz o zavarljivosti osnovnog i dodatnog materijala prema aspektu toplih pukotina.

Svaki od pokusa sadrži 3 podvarijante gdje su vrijednosti unosa topline izmijenjeni kako bi se dobio uvid u ponašanje osnovnog i dodatnog materijala te na koji način unos topline utječe na inicijaciju pukotina tijekom procesa zavarivanja.

3.2. Plan eksperimenta:



Slika 42. Shematski prikaz plana pokusa [1]

3.3. Odabir materijala:

3.3.1 Osnovni materijal:

Čelik S355 (Werkstoffnummer 1.0549) spada u opće konstrukcijske čelike za široku upotrebu uz odličnu zavarljivost te se često koristi zbog boljih mehaničkih svojstava s obzirom na konvencionalno upotrebljavan čelik S255. Isporučuje se hladno valjan u pločama lima, profilima i cijevima u širokom spektru debljina, ovisno o eksploatacijskim svojstvima. Široko se upotrebljava u građevinskoj, proizvodnoj, brodograđevinskoj i off-shore industriji zbog niske cijene i široke dostupnosti. [68, 69]

Toplinska obrada u svrhu očvrnuća čelika S355 nije preporučljiva, ali je u ograničenim mogućnostima dozvoljena. U slučaju da se toplinska obrada provodi, faktori poput vršne temperature, brzine zagrijavanja i hlađenja te vremena držanja ovise o obliku, veličini i debljini profila. Generalne preporuke za toplinsku obradu normalizacije je zagrijavanje na temperaturu 20 °C– 50 °C iznad temperature A_{c3} (911 °C) te držanja 3min / 1mm debljine. Očekivano poboljšanje mehaničkih svojstava je povećanje žilavosti i čvrstoće materijala uz eliminaciju segregacija u obliku dendritnih zrna unutar mikrostrukture. [68, 69, 70]

Oznaka u sufiksu: N označava da je čelik S355NL prošao toplinsku obradu normalizacije, a oznaka L označava da je čelik pogodan za eksploataciju pri niskim temperaturama do - 50 °C. Zavarljivost ovog čelika ne ovisi bitno o obliku, dimenzijama i debljini radnog komada te nije osobito osjetljiv na nečistoće u mikrostrukturnom sastavu. [69, 70]

Kako bi se osigurala vjerodostojnost odabira osnovnog materijala, provedena je analiza kemijskog sastava u laboratoriju za korozijsku zaštitu na uređaju za ispitivanje kemijskog sastava XRF – X ray Fluorescence Analyzer. Uređaj radi na principu apsorpcije primarnih rentgenskih zraka koje pobuđuju različite atome koji zauzvrat emitiraju sekundarne rentgenske zrake. [71]

Svaki kemijski element emitira rentgensku zraku različite energetske razine koju uređaj mjeri te pruža kvalitativan i kvantitativan ispis podataka o kemijskom sastavu s obzirom na debljinu i veličinu ispitnog uzorka. [71]

U tablici 15 ispod nalaze se podaci o očekivanom kemijskom sastavu za čelike koji spadaju u grupu 1.1 propisanu prema normi HRN EN ISO 15608:2005.

Tablica 6. Kemijski sastav materijala S355NL izražen u postocima [69]

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	Cu	Fe
maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks
0.18	0.5	1.65	0.5	0.03	0.02	0.3	0.1	0.35	Ostatak

Tablica 7. Kemijski sastav materijala S355NL izražen u postocima dobiven XFR analizom [1]

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	Cu	Fe
maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks
0.15	0.23	0.83	-----	0.01	0.015	0.05	0.013	0.19	98.69

Tablica 8. Mehanička svojstva S355 NL [70]

Debljina stjenke [mm]	Re [N/mm²]	Rm [N/mm²]	Produljenje %
≤ 16	355	470 – 630	22
> 16 ≤ 40	345	470 – 630	22
> 40 ≤ 65	335	470 – 630	22

Tablica 9. Udar na radnja loma S355 NL [70]

Čelik	Smjer valjanja zrna	0°C	-20°C	- 40°C	- 50°C
S355NL	Longitudinalni	50 J	40 J	33 J	

3.3.2 Dodatni materijal:

Dodatni materijal za izradu ispitnih zavara:

Kako bi se povećali izgledi nastanka toplih pukotina, za pokuse je kao dodatni materijal odabrana žica visokolegiranog nehrđajućeg i austenitnog čelika klasifikacije Lincoln Electric ER 309 LSi. Tipična primjena ovakve žice je u tehnici spajanja nehrđajućih austenitnih ili duplex čelika koji se odlikuju visokom istezljivošću, do 45 %. [72, 74]

Kemijski sastav žice opisan u tablici 19 se odlikuje povišenom količinom udjela silicija koji poboljšava žitkost taline te utječe na stvaranje glatke površine zavarenog spoja. Sama žica pruža povećanu otpornost na opću i interkristalnu koroziju. Osim za spajanje visokolegiranih nehrđajućih čelika, prikladna je za spajanje niskolegiranih i nelegiranih čelika te spajanje raznorodnih zavarenih spojeva. [72, 74]

Tablica 10. Kemijski sastav dodatnog materijala ER 309 LSi [72]

C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	Si	Fe
0.02	24.0	0.09	1.70	0.20	13.0	0.02	0.85	Ostatak

U tablici 20. ispod nalaze se opće preporuke proizvođača dodatnog materijala za podešavanje parametara za zavarivanje kako bi se ostvario što bolji prijenos metala u različitim tipovima električnog luka. [74]

Tablica 11. Preporuka proizvođača za odabir parametara za zavarivanje [74]

Promjer žice	Vrsta struje	Jakost struje	Napon struje	Slobodni kraj žice	Plin
1.2 mm	DC (+ pol)	200 – 235 A	24 – 28 V	12 – 18 mm	98% Ar + 2% CO ₂
1.2 mm	DC (+ pol)	200 – 235 A	24 – 28 V	12 – 18 mm	98% Ar + 2% CO ₂
1.2 mm	DC (+ pol)	235 – 350 A	24 – 36 V	8 – 12 mm	98% Ar + 2% CO ₂

Tablica 12. Očekivane vrijednosti mehaničkih svojstava dobivene nakon zavarivanja [72]

Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	Produljenje [%]
385	600	36

Dodatni materijal za izradu ukrutnih zavara:

Dodatni materijal korišten za izradu pripoja i izradu ukruta je korištena žica proizvođača Elektroda Zagreb klasifikacije EZ – SG 2. Žica je pobakrena kako bi se zaštitila od oksidacije u okolišnoj atmosferi tijekom skladištenja i eksploatacije te se koristi za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO₂ ili mješavine plinova Ar/CO₂. Preporuča se zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm². [73]

Tablica 13. Orijentacijski kemijski sastav žice izražen u postotcima [73]

C	Mn	Si	Cu	Fe
0.06 – 0.13 %	1.4 – 1.6 %	0.7 – 1.0 %	< 0.3 %	ostatak

Tablica 14. Očekivane mehaničke vrijednosti zavarenog spoja [73]

Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	Izduženje [%]	URL (-40 °C)[J]
> 430	500 – 640	> 22	> 47

3.4. Plan pokusa:

Tema pokusa je ispitivanje sklonosti običnog konstrukcijskog čelika S355NL toplim pukotinama kada se zavaruje dodatnim materijalom od visokolegiranog nehrđajućeg čelika ER 309 LSi. S obzirom na to da je čelik S355 NL relativno ne osjetljiv na tople pukotine, tijekom pokusa će biti korištena tri seta različitih parametara kako bi se postiglo povećanje miješanja dodatnog i osnovnog materijala te se time moguće nečistoće koncentrirale na površini zavara kao niskotaljive faze. Osim parametara, jedan od ispitnih uzoraka će sadržavati povećanu količinu nečistoća kojom bi se dodatno povećala mogućnost stvaranja toplih pukotina solidifikacijskog tipa.

3.5. Priprema ispitnih uzoraka:

Rezanje se vrši iz ploče lima debljine 8 mm plinskim postupkom rezanja te su nakon rezanja pločice bile ostavljene na zraku kako bi se ohladile prije postupke brušenja i poliranja. Sve kontaktne površine gdje se polažu zavareni spojevi su brušene i polirane do visokog sjaja kako bi se osigurao što ravnomjernije nalijeganje ploče na ploču. S povećanjem razmaka između ploča povećava se i rizik od toplih pukotina. Nakon brušenja i poliranja, ploče su očišćene od masti i nečistoća 90% alkoholom. Proces pripreme ispitnih uzoraka za obje metode, Varestraint i kutni spoj uz ispitivanje pucanjem metodu je bio u potpunosti jednak.

3.6. Varestraint metoda ispitivanja:

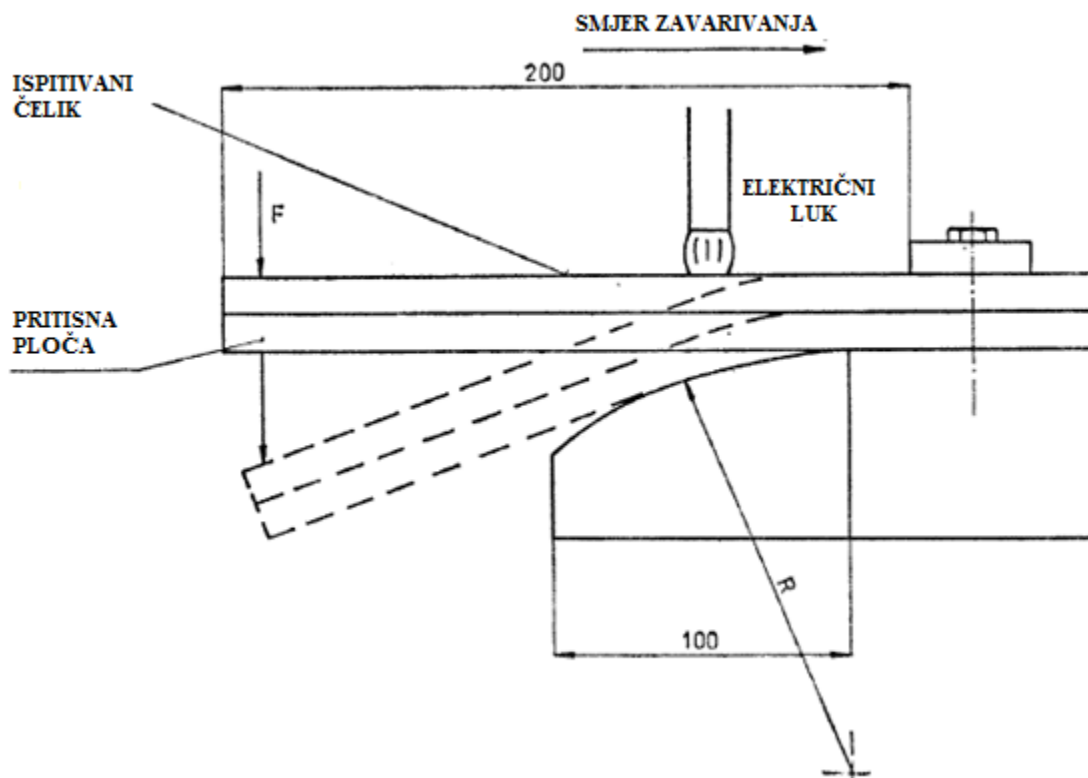
Cilj pokusa:

Prvi pokus je ispitivanje Varestraint metodom – varijanta ispitivanja sa narinutim vanjskim opterećenjem (prema normi prEn ISO 17641-3). U Varestraint metodi je opterećenje narinuto na zavar longitudinalno u smjeru zavarivanja. Tipovi pukotina koje se mogu otkriti ovom vrstom ispitivanja su: solidifikacijske, likvacijske i pukotine. Ova metoda je primjenjiva za ispitivanje podložnosti toplim pukotinama osnovnog materijala – njegov odabir i odobrenje te dodatnog materijal prema odgovarajućem WPS-u. izazvane padom istezljivosti. [67]

Parametri postupka zavarivanja:

- Nizak unos topline: 12,5 V, 85 A, 18 cm/min
- Visok unos topline: 13,5 V, 220 A, 11 cm/min

Sve parametre tijekom zavarivanja snimiti i pratiti. Tijekom procesa zavarivanja se očekuje da je ukupna duljina vidljivih pukotina funkcija naprezanja izazvanog savijanjem. Relativan položaj pukotine i radiusa zakrivljenja ispitnog uzorka daje procjenu podložnosti materijala na tople pukotine. Važna napomena je da naprezanja izazvana tijekom ispitivanja nisu ni približno slična onima koja se javljaju tijekom eksploatacije i montaže zavarenih konstrukcija, te bi bilo poželjno moći usporediti ponašanje istog materijala u dvije različite situacije – laboratorijska i stvarna.



Slika 43. Shematski prikaz izvođenja Varcstraint metode [67]

Izmjene na procesu zavarivanja su napravljene kako bi se simulirali realni uvjeti u eksploataciji te se umjesto TIG procesa zavarivanja koristi MAG postupak s tri različita seta parametara. Prvi set parametara je odabran kako bi se simulirao nizak unos topline prijenosom materijala električnim lukom kratkoga spoja te se ujedno ostvarilo minimalno miješanje osnovnog i dodatnog materijala.

Drugi set parametara je za određeni gradijent veći s obzirom na prethodni kako bi se ostvario prijenos materijala prijelaznim električnim lukom te se stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala povećao. Treći set parametara predstavlja dodatni gradijent uvećanja parametara kako bi se ostvario prijenos materijala štrcajućim električnim lukom te se stupanj miješanja još dodatno povećao.

Ispitni uzorak:

Preporučene dimenzije su određene prema normi:

- Dužina: 80 - 300 mm +/- 1 mm
- Širina: 40 – 100 mm +/- 2 mm
- Debljina: 10 mm +/- 0,1 mm ili prema mogućnostima

Priprema površine mora biti podvrgnuta mehaničkoj obradi kako bi se ostvarila kvaliteta površine minimalno 6.3 mikrometara ili bolje, a površinska oštećenja okomita na smjer pružanja zavara se moraju u potpunosti ukloniti. Rubovi moraju biti pobrušeni u radiusu od 1 mm.

Promatranje uzroka se vrši mikroskopom sa povećanjem 10 i 25 puta kako bi se mogle otkriti pukotine dužine barem 0,1 mm. Prema normi, proces zavarivanja uključuje da je na osnovni materijal ovisno o izvedbi, potrebno navariti metal TIG postupkom po sredini samog ispitnog uzorka.

S obzirom na mogućnosti, modifikacije su poduzete kako bi se Varestraint metoda ispitivanja uspješno primijenila. Pripremljeni uzorak je izrezan na dimenzije koje se nalaze unutar prihvatljivog područja prema normi prEN ISO 17641 -3. [67]

- Tri seta po 1 pločice: 250 mm x 40 mm debljine 8 mm

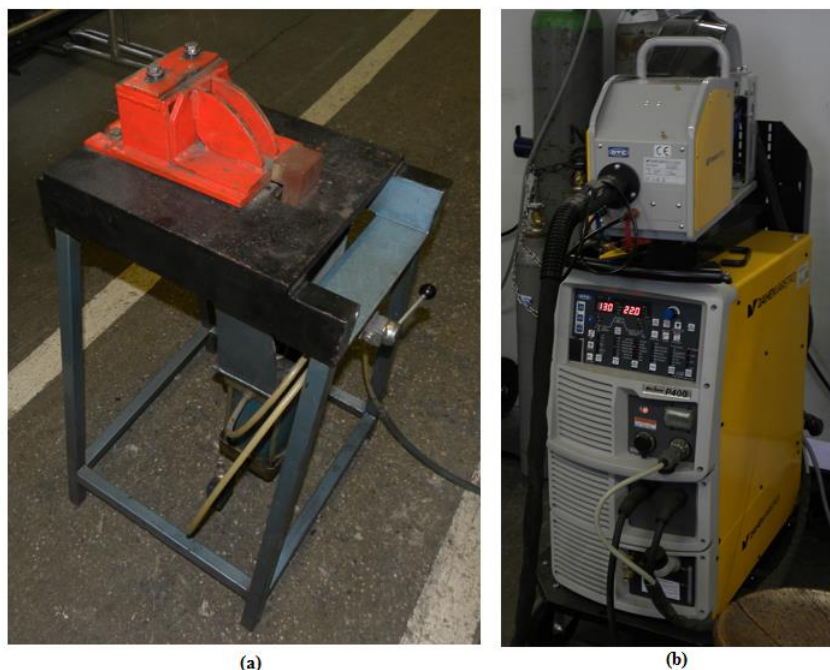


Slika 44. Ispitni uzorak pripremljen za Varestraint metodu [1]

Proces zavarivanja:

Prema normi prEN ISO 17641 -3 i prema mogućnosti laboratorija, određeno je da će proces zavarivanja biti izvođen na automatu za zavarivanje Bugo te će biti korištena MAG tehnologija zavarivanja s tri seta parametara kako bi se dobio uvid kako unos topline i stupanj miješanja utječe na stvaranje toplih pukotina. [67]

Zavarivanje se vrši u uređaju za savijanje napravljenim za ispitivanje toplih pukotina, te se na ispitnim uzorcima polaže zavar u duljini od 80 mm po samoj sredini uzorka. Tijekom ili nakon zavarivanja, ovisno o mogućnostima se aktivira uređaj za savijanje čija je minimalna brzina savijanja 1.8 mm/s. Savijanje mora biti sinkronizirano s procesom zavarivanja. Pred kraj procesa zavarivanja dok se kraj zavara odnosno navara nalazi u toplom stanju kristalizira, stroj se aktivira i naglo savija oko kalupa radiusa R u uzdužnom smjeru zavara. [67]



Slika 45. Uređaji korišteni tijekom izvođenja procesa zavarivanja i procesa provođenja ispitivanja.

Slika 45 prikazuje: (a) Uređaj za V-restraint metodu ispitivanja, (b) izvor struje za zavarivanje korišten za izvođenje probnih i ispitnih zavara [1]

Uređaj za savijanje se sastoji od nekoliko ključnih cjelina – postolje uređaja i kućište za hidrauličku prešu, stezna naprava za ispitni uzoraka, kalup sa zakrivljenjem, klin za savijanje hidrauličkom prešom. Kontrolna ručica na uređaju za savijanje aktivira uređaj, te je prije zavarivanja napravljena radna proba kako bi se ispitala ispravnost uređaja i provjerila brzina savijanja. [67]

Prema uputi, zadan je set parametara za tri varijante vareistaint pokusa. U tablici 24 su dani parametri kojima se želi ostvariti tri različite vrste električnog luka odnosno prijenosa materijala. S obzirom na različite parametre, postiže se različita penetracija i stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala te se pomoću tih aspekata teži dobiti uvid u stvaranje toplih pukotina.

Tablica 15. Različiti setovi parametara za tri varijante pokusa [1]

PARAMETRI	VARIJANTA 1	VARIJANTA 2	VARIJANTA 3
Postupak zavarivanja	135 MAG	135 MAG	135 MAG
Promjer dodatnog materijala:	1,2 mm	1,2 mm	1,2 mm
Vrsta dodatnog materijala	ER 309 LSi	ER 309 LSi	ER 309 LSi
Jakost struje:	130 A	230 A	320 A
Napon struje	22V	26	34
Vrsta struje i polaritet	DC struja + pol	DC struja + pol	DC struja + pol
Vrsta plina	Ar 98% + CO2 2%	Ar 98% + CO2 2%	Ar 98% + CO2 2%
Protok plina:	18 l/min	18 l/min	18 l/min
Slobodni kraj žice	15 mm	15 mm	15 mm
Brzina dodavanje žice	4 m/min	7 m/min	11 m/min
Brzina zavarivanja	300 mm/min	350 mm/min	390 mm/min
Unos topline	0,5 kJ/mm	1,25 kJ/mm	2,15 kJ/mm

Tijek izvođenja pokusa Varestraint metoda:

Nakon pripreme uređaja za ispitivanje, ispitnog uzorka i unošenja parametara u stroj za zavarivanje, zavarivanje je izvedeno kontinuirano u dužini do 100 milimetara. Za vrijeme izvođenja je 15 mm prije završetka ispitnog uzorka aktiviran stroj za savijanje kojim se ispitni uzorak, debljine 8 mm savio po radijusu od 100 mm. Visina hoda koju stroj napravi tijekom savijanja je 100 mm te taj put prijeđe u 2 sekunde, što zadovoljava zahtjev postavljen u normi da minimalna brzina savijanja mora biti 1.8 mm/s. [67]

Za svaki od ispitnih uzoraka, korišteni parametri su najprije empirijski pronađeni prije početka zavarivanja na probnim uzorcima kako bi se pronašli što nepovoljniji uvjeti za ostvarivanje toplih pukotina. Osim nepovoljnih parametara, u svaki je zavar dodana količina sumpora kao dodatna nečistoća kako bi se ispitala kolika je količina sumpora kritična za stvaranje toplih pukotina tijekom procesa zavarivanja. [67]

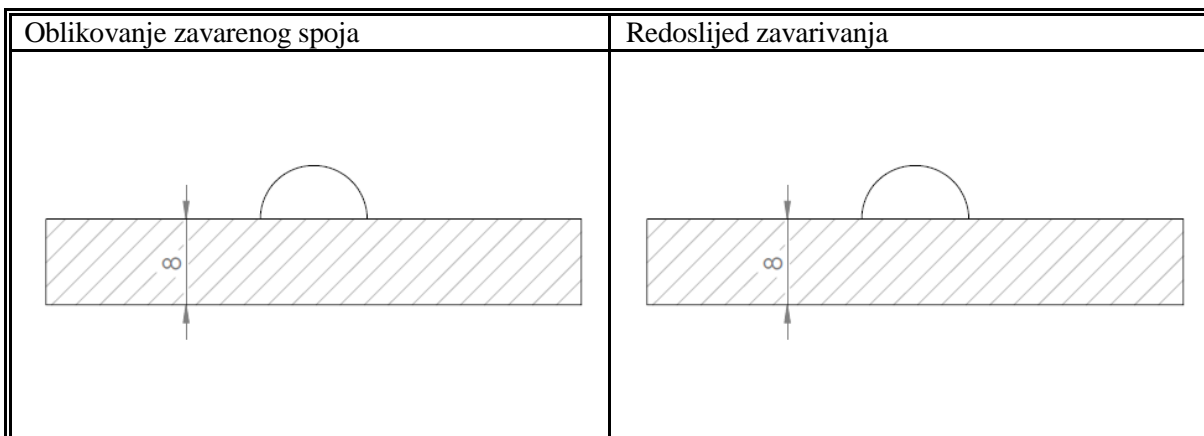
Specifikacija postupka zavarivanja WPS FSB 06/2015 – 1 sadrži sve potrebne informacije o parametrima potrebnim za izvođenje zavarivanja.

Tablica 16. Preliminarni izračun unosa topline prije procesa zavarivanja [1]

Varijanta 1	Varijanta 2	Varijanta 3
$Q = \frac{U \times I}{v}, \quad kJ/mm$	$Q = \frac{U \times I}{v}, \quad kJ/mm$	$Q = \frac{U \times I}{v}, \quad kJ/mm$
$Q = \frac{22 \times 130}{300} \times \frac{60}{1000}$	$Q = \frac{26 \times 230}{350} \times \frac{60}{1000}$	$Q = \frac{34 \times 320}{390} \times \frac{60}{1000}$
$Q = 0,575 \text{ kJ/mm}$	$Q = 1,05 \text{ kJ/mm}$	$Q = 1,67 \text{ kJ/mm}$

Oznaka uputstva za zavarivanje(WPS): WPS FSB 06/2015 - 1
Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR):
Poduzeće:
Ime zavarivača: Krešimir Sukobljević
Postupak zavarivanja: MAG 135
Vrsta spoja: Navarivanje
Pojedinosti pripreme rubova: bez pripreme

Ispitno mjesto: FSB, Zagreb
Način pripreme rubova i čišćenja: bez predgrijavanja, brušenje i čišćenje alkoholom prije plinskog rezanja, brušenje i odmašćivanje poslje plinskom rezanja
Specifikacija osnovnog materijala: HRN EN 15608 - 1.1
Debljina osnovnog materijala: 8 mm
Položaj zavarivanja: PA



Pojedinosti postupka zavarivanja:

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
VM – V1	135 MAG	1,2	130	22	DC impuls (+ pol)	4	300	0,5
VM – V2	135 MAG	1,2	230	26	DC impuls (+ pol)	7	350	1,25
VM – V3	135 MAG	1,2	320	34	DC impuls (+ pol)	11	390	2,15

Dodatni materijal:

- vrsta i trgovačko ime: Lincoln Electric ER 309 LSi
 Promjer: 1,2 mm

Zaštitni plin/prašak:

- zaštitni plin: HRN EN ISO 14175: M12
 - korijenska zaštita: ---

Protok praška:

- zaštitnog plina: 18 l/min
 - plina za korijensku zaštitu: ---

Wolfram-elektroda/promjer: ---

Pojedinosti o žljebljenju/osiguranju taline: ---

Temperatura predgrijavanja: ---

Meduslojna temperatura: ---

Toplinska obrada: ---

Vrijeme, temperatura, postupak: ---

Brzina grijanja i hlađenja: ---

Dodatne informacije:

- Kutni spoj ispituje podložnost solidifikacijskim pukotinama isključivo dodatni materijal – visokolegirani nehrđajući čelik
- Zavarivanje PB položaj, ostvariti nadvišenje zavora minimalno 5mm
- Zavarivamo najprije desnu pa lijevu stranu koja se zavariva unutar 20 sekundi nakon prvog zavora
- Zavar se teži izvesti što konveksnijim (manje bombee), izvoditi zavoru brzo, ostvariti što eliptičniji zavar ilizavar suzastog oblika
- Teži se ostvariti što manju površinu zavora s obzirom na površinu zavarenih limova
- Prema preporuci dodati povećane količine nečistoća u obliku sumpora kako bi se ispitalo nastajanje niskotaljivih sulfidnih faza

3.7. Ispitivanje na pukotine u samoukružujućem T – spoju:

Cilj postupka:

Samoukružujući T-spoj metoda ispitivanja sklonosti ka toplim pukotinama se provodi zbog toga što se pomoću te metode može ispitati sklonost i osnovnog i dodatnog materijala na nastanak solidifikacijskih pukotina. S obzirom na broj i duljinu pukotina, kvantitativan podatak služi isključivo tome da se može kvalitativno izreći kakve se i u kojoj mjeri tople pukotine mogu očekivati. Glavni razlog nastanka pukotina solidifikacijskog tipa je nemogućnost stezanja zavarenog spoja zbog smanjene deformabilnosti ukrućenih zavarenih radnih komada.

Ispitni uzorak:

Za izvođenje pokusa kutni spoj uz ispitivanje pucanjem je prema normi 17641 -2 odabrana varijanta C s obzirom na mogućnosti laboratorija i teže dostupnosti lima debljine 40 mm za varijantu B. Varijanta C uključuje izradu pet pločica od kojih su dvije predviđene za zavarivanje kutnog spoja te su tri predviđene preostale pločice namijenjene kao ukrute. Pripremljeni uzorci su izrezani na dimenzije koje se nalaze unutar prihvatljivog područja prema normi prEN ISO 17641 -2.

Prema uputi u normi prEN ISO 17641 -2 je predviđen ispitni uzorak sljedećeg izgleda, te su pripremljene pločice unutar prihvatljivog dimenzijskog ograničenja prema zadanoj normi:

- Tri seta po 2 pločice: 120 mm x 80 mm x 8 mm
- Tri seta po 3 pločice: 80 mm x 40 mm x 8 mm

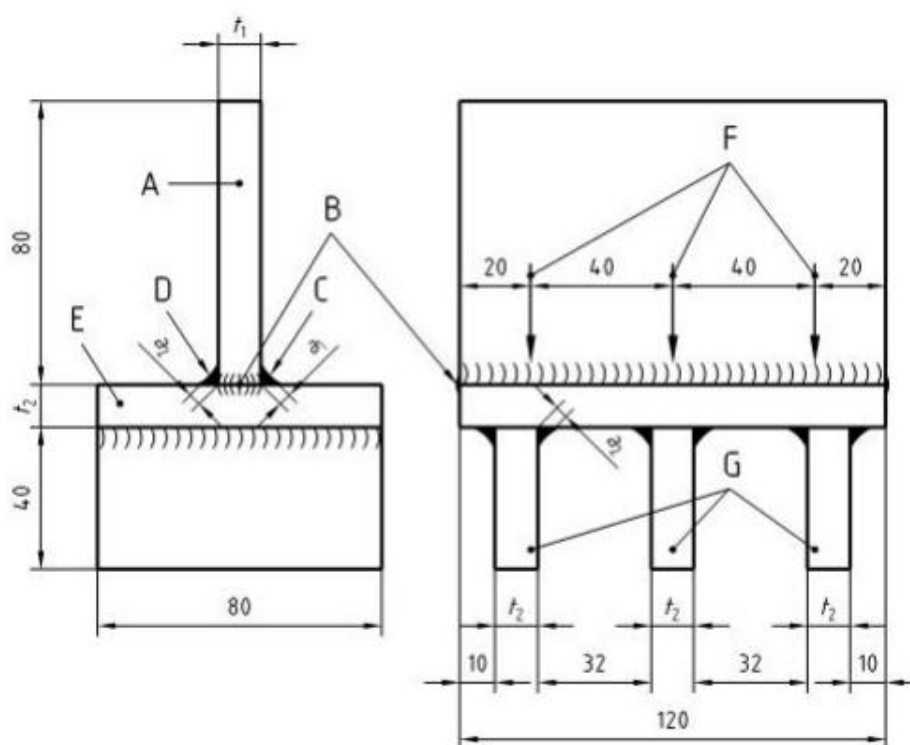
Proces zavarivanja:

Prije samog zavarivanja na ispitnim uzorcima, provedena je radna proba kako mi se empirijski utemeljilo ponašanje i izgled taline, geometrija zavarenog spoja i podložnost toplim pukotinama. Kemijski sastav čelika je provjeren pomoću XFR uređaja te je ustanovljena visoka čistoća čelika uz iznimno nisku koncentraciju sumpora i fosfora te je zbog toga mogućnost za pojavljivanje solidifikacijskih pukotina također iznimno niska.

Kako bi se mogućnost za pojavljivanje toplih pukotina solidifikacijskog tipa povećala, dodana je kontrolirana količina sumpora u težini od 1 mg.

Nakon pripreme ukruta na ispitnim uzorku, provelo se ponovno čišćenje i odmašćivanje površine kako bi se umanjio utjecaj ne kontroliranih nečistoća unesenih u zavareni spoj. Prema normi HRN EN ISO 17432 -2:2004, proces zavarivanja ispitnih zava se provodi u kontinuitetu jedan nakon drugog uz najveći dopušteni vremenski razmak od 20 sekundi.

Prvi zavar služi kao ukruta koja sprječava kutnu deformaciju drugog, odnosno ispitnog kutnog zava. Sprječavanje kutne deformacije, povećana koncentracija nečistoća, spajanje raznorodnih metala i korištenje neodgovarajućih parametri su u kombinaciji mehanizam za jednostavno nastajanje toplih pukotina solidifikacijskog tipa u kutom zavaru. Katkada je u praksi vrlo teško izbjeći sve od navedenih otežavajućih faktora te se ovim putem teži dobiti uvid u ponašanje taline i zavarenog spoja korištenjem tri seta parametara, odnosno tri različita stupnja unosa topline koji će davati različite vrste i oblike toplih pukotina.



Slika 46. Prikaz ispitnog uzorka za T-spoj metodu [67]

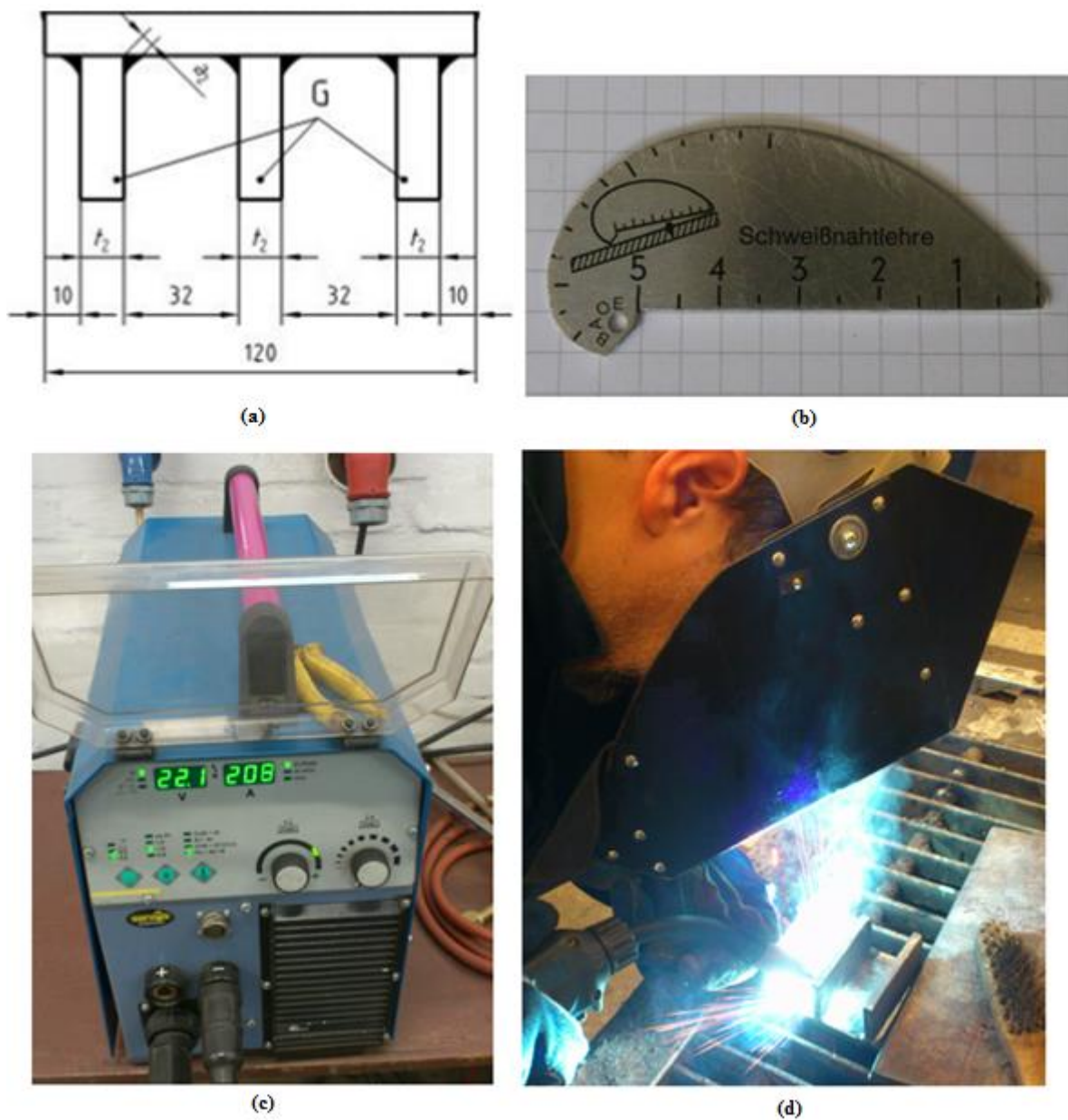
Parametri postupka zavarivanja - ukrutni zavari:

Prema normi prEN ISO 17641 -2 je za postupak zavarivanja najprije određeno da se zavarivanje provodi u PB položaju, da se najprije izrađuju pripojni zavari ukruta te se ukrute zavarivaju na visinu od 5 mm. Nakon zavarivanja svi se zavari moraju očistiti od troske i toplinska se obojenja na zoni utjecaja topline moraju poliranjem ukloniti. [67]

Parametri za izradu zavara ukrutnih pločica su bili eksperimentalno određeni prije samog procesa zavarivanja na pokusnim radnim komadima kako bi se ustanovili pravilni parametri za dobivanje visine zavara 5 mm. Pronađeni parametri su očitani i izmjereni na izvoru struje za zavarivanje:

Tablica 17. Parametri za zavarivanje ukrutnih pločica na ispitnom uzorku [1]

Postupak zavarivanja	135 MAG
Promjer dodatnog materijala:	1,2 mm
Vrsta dodatnog materijala	EZ – SG 2
Jakost struje:	195 A
Napon struje	23,5 V
Vrsta struje i polaritet	DC struja + pol
Vrsta plina	Ar 98% + CO2 2%
Protok plina:	18 l/min
Slobodni kraj žice	15 mm
Brzina dodavanje žice	7 m/min
Brzina zavarivanja	400 mm/min
Unos topline	0,6815 KJ/mm



Slika 47. Grupa slika: pripreme za zavarivanje ukrutnih zavora [67]

Na slici 46 (a) – tehnička dokumentacija ukrutnih zavora, (b) – instrument za mjerenje visine zavora, (c) – izvor struje za zavarivanje, (d) – laborant zavarivač vrši izradu ukrutnih zavora.



Slika 48. Pripremljene ukrute prije zavarivanja [1]



Slika 49. Zavarene ukrute, pripremljene za daljnje provođenje ispitivanja [1]

Parametri postupka zavarivanja – ispitni zavari:

Proces zavarivanja ispitnog uzroka se vrši nakon zavarivanja ukrutnih pločica, te su parametri za zavarivanje podijeljeni u tri seta, svaki za različiti unos topline.

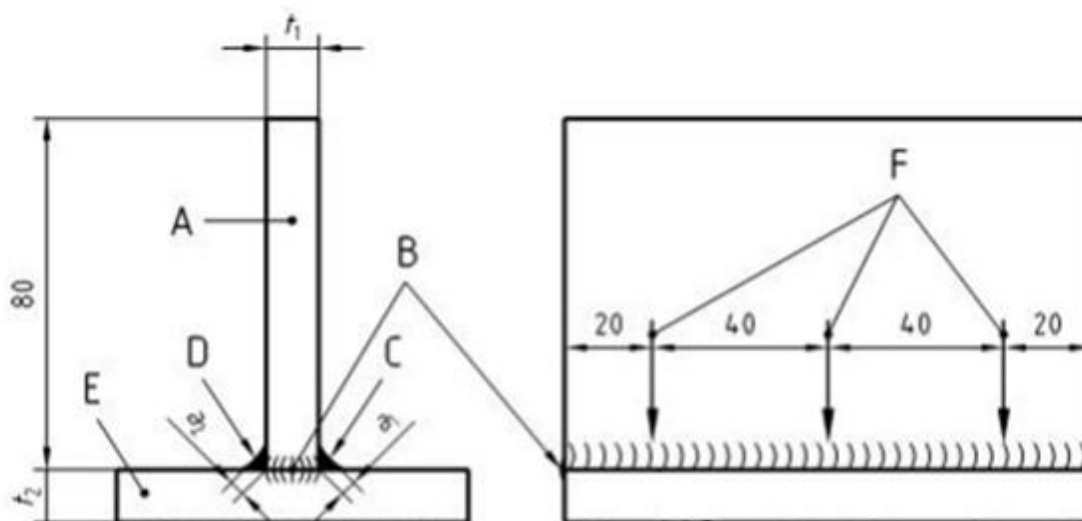
Tablica 18. Različiti setovi parametara za tri varijante pokusa [1]

PARAMETRI	VARIJANTA 1	VARIJANTA 2	VARIJANTA 3
Postupak zavarivanja	135 MAG	135 MAG	135 MAG
Promjer dodatnog materijala:	1,2 mm	1,2 mm	1,2 mm
Vrsta dodatnog materijala	ER 309 LSi	ER 309 LSi	ER 309 LSi
Jakost struje:	130 A	230 A	320 A
Napon struje	22 V	26 V	34 V
Vrsta struje i polaritet	DC struja + pol	DC struja + pol	DC struja + pol
Vrsta plina	Ar 98% + CO ₂ 2%	Ar 98% + CO ₂ 2%	Ar 98% + CO ₂ 2%
Protok plina:	18 l/min	18 l/min	18 l/min
Slobodni kraj žice	15 mm	15 mm	15 mm
Brzina dodavanje žice	4 m/min	7 m/min	11 m/min
Brzina zavarivanja	300 mm/min	350 mm/min	390 mm/min
Unos topline	0,5 kJ/mm	1,25 kJ/mm	2,15 kJ/mm

Izgled zavarenog spoja je zadan prema normi prEN ISO 17641 -2 te se izrađuje na način da se najprije izradi zavar a₁ prema zadanim parametrima te se odmah nakon ili do 20 s nakon polaganja prvog zavara a₁ izrađuje zavar a₂. Prema normi je preporučeno da veličine zavara a₁ i a₂ moraju biti približno slične te da je dozvoljeno odstupanje u visini zavara a₂ s obzirom na zavar a₁ do 20%. Prema slici 72, kontrolne točke F su mjesta gdje se vrše mjerenja pod mikroskopom kako bi se utvrdila ukupna duljina toplih pukotina nastala tijekom zavarivanja. [67]

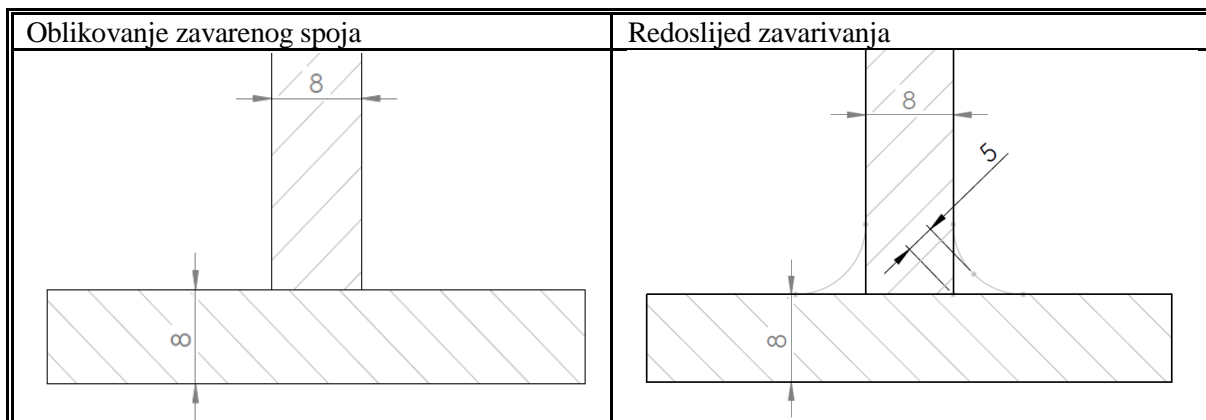
Prije samog ispitivanja zavarenog spoja, visine zavora moraju biti provjerene na svim mjernim točkama (F) specificiranim prema normi. Oba zavora moraju zadovoljiti minimalnu visinu od 5 mm te visina zavora a_1 ne smije prekoračiti visinu zavora a_2 za više od 120%. U slučaju da ovaj uvjet nije zadovoljen, ispitivanje se proglašava nevaljanim. [67]

Kutni spoj se ispituje pod optičkim mikroskopom s uvećanjem ne većim od x5. Također je moguće iskoristiti ispitivanje penetrantima kao metodu nerazornog ispitivanja kako bi se pukotine mogle lakše detektirati. Prema iskustvu, prvi zavar a_1 bi trebao biti bez pukotina, dok se bilo kakve pukotine u zavaru a_2 moraju zabilježiti. Zabilježava se lokacija, orijentacija i duljina svake pukotine u ispitno izvješće određeno i prikazano u aneksu A unutar norme prEN ISO 17641 -2. [67]



Slika 50. Prikaz u nacrtu i bokocrtu izgled ispitnih zavora i kontrolnih točaka [67]

Specifikacija postupka zavarivanja WPS FSB 06/2015 – 2 sadrži sve potrebne informacije o parametrima potrebnim za izvođenje zavarivanja.

Mjesto: Zagreb**Postupak zavarivanja:****Oznaka uputstva za zavarivanje(WPS):** WPS FSB 06/2015 - 2**Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR):****Poduzeće:****Ime zavarivača:** Krešimir Sukobljević**Postupak zavarivanja:** MAG 135**Vrsta spoja:** FW (Kutni spoj)**Pojedinosti pripreme rubova:** bez pripreme**Ispitno mjesto:** FSB, Zagreb**Način pripreme rubova i čišćenja:** bez predgrijavanja, brušenje i čišćenje alkoholom prije plinskog rezanja, brušenje i odmašćivanje posle plinskog rezanja**Specifikacija osnovnog materijala:** HRN EN 15608 - 1.1**Debljina osnovnog materijala:** 8 mm**Vanjski promjer:** Nema**Položaj zavarivanja:** PB

Pojedinosti postupka zavarivanja:

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
VM - T1	135 MAG	1,2	130	22	DC impuls (+ pol)	4	300	0,5
VM - T2	135 MAG	1,2	230	26	DC impuls (+ pol)	7	350	1,25
VM - V3	135 MAG	1,2	320	34	DC impuls (+ pol)	11	390	2,15

Dodatni materijal:

- vrsta i trgovačko ime: Lincoln Electric ER 309 LSi
 Promjer: 1,2 mm

Zaštitni plin/prašak:

- zaštitni plin: HRN EN ISO 14175: M12
 - korijenska zaštita: ---

Protok praška:

- zaštitnog plina: 18 l/min
 - plina za korijensku zaštitu: ---

Wolfram-elektroda/promjer: ---**Pojedinosti o žljebljenju/osiguranju taline:** ---**Temperatura predgrijavanja:** ---**Međuslojna temperatura:** ---**Toplinska obrada:** ---**Vrijeme, temperatura, postupak:** ---**Brzina grijanja i hlađenja:** ---**Dodatne informacije:**

- Kutni spoj ispituje podložnost solidifikacijskim pukotinama isključivo dodatni materijal – visokolegirani nehrđajući čelik
- Zavarivanje PB položaj, ostvariti nadvišenje zavara minimalno 5mm
- Zavarivamo najprije desnu pa lijevu stranu koja se zavariva unutar 20 sekundi nakon prvog zavara
- Zavar se teži izvesti što konveksnijim (manje bombe), izvoditi zavare brzo, ostvariti što eliptičniji zavar ilizavar suzastog oblika
- Teži se ostvariti što manju površinu zavara s obzirom na površinu zavarenih limova
- Prema preporuci dodati povećane količine nečistoća u obliku sumpora kako bi se ispitalo nastajanje niskotaljivih sulfidnih faza

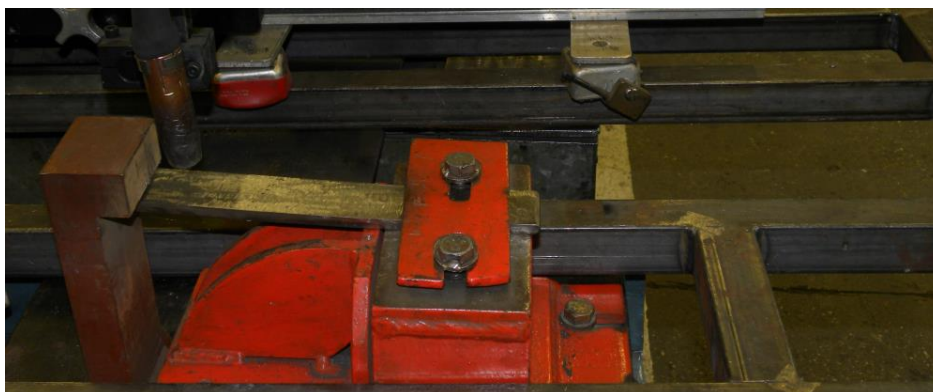
Radna proba:



Slika 51. Uređaj za mehanizirano vođenje procesa zavarivanja Bugo [1]



Slika 52. Uzorak za ispitivanje ponašanja taline pri kombinacijama parametara [1]



Slika 53. Uređaj za savijanje za Vareststraint metodu ispitivanja toplih pukotina [1]

Slijed čišćenja i ispitivanja:

Nakon mjerenja je provedeno čišćenje zavarenog spoja od prašine, troske i termalnih obojenja unutar zone utjecaja topline te je nakon toga napravljena vizualna kontrola kojom se pokušalo ustanoviti postojanje pukotina, njihov pojavni oblik i dimenzije te je nakon vizualne provedena kontrola penetrantima kako bi se provjerile i razlučile indikacije pukotina od lažnih indikacija.



Slika 54. Ispitni uzorci nakon procesa zavarivanja [1]

3.8. Nerazorna ispitivanja:

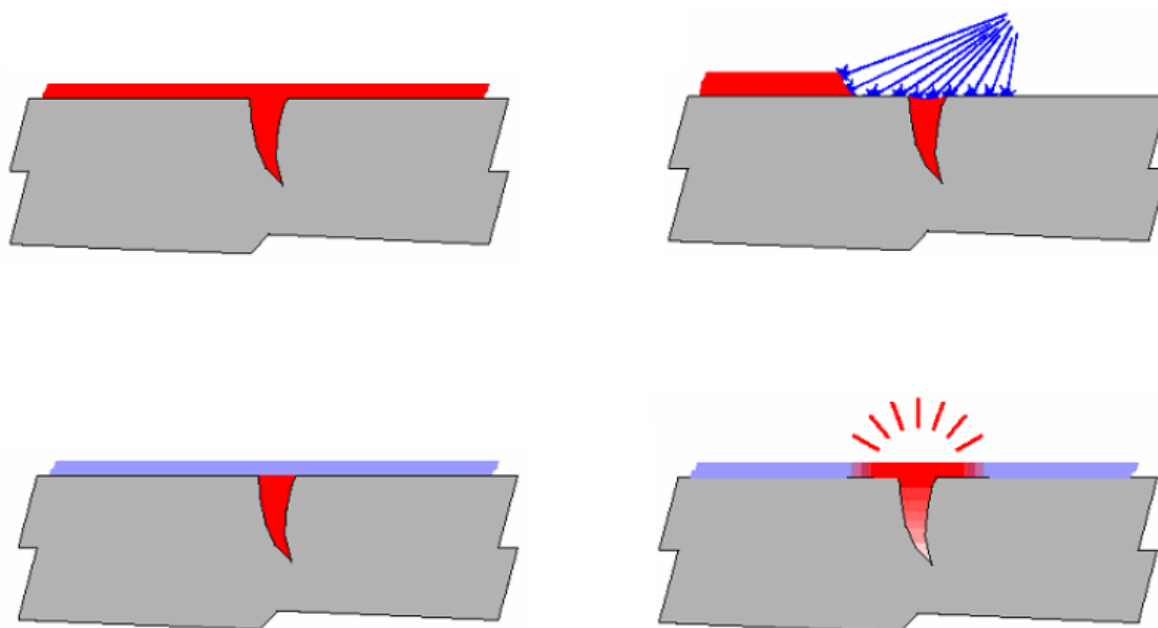
Nakon završetka zavarivanja provodi se vizualna kontrola kako bi se ustanovio broj i dužina pukotine. Nakon hlađenja zavara na sobnu temperaturu, provodi se ispitivanje zavara penetrantskom metodom. Penetrantsko ispitivanje se provodi s ciljem kako bi se detektirale površinske pukotine dubine i dužine manje od 1 mm te je vrlo brzo i pouzdano rješenje kako bi se potvrdili rezultati dobiveni vizualnom metodom nerazornog ispitivanja. [75]

Prednosti korištenja penetrantske metode su : [75, 76]

- jednostavnost primjene
- velika osjetljivost na sitne prekidnosti
- doze sa sredstvima su lagane i pogodne za terenska ispitivanja
- cijena sredstava za ispitivanje i odgovarajuće opreme je niska
- nije potrebna električna struja za provedbu ispitivanja

Slijed ispitivanja se sastoji od: [75, 76]

- priprema površine - čišćenje
- nanošenje penetranta – *vrijeme penetriranja 5 do 60 min*
- odstranjivanje suviška penetranta s površine
- nanošenje razvijaača – *vrijeme razvijanja 10 do 30 min*
- promatranje - *praćenje razvijanja indikacija za vrijeme razvijanja*
- pregled i bilježenje indikacija - *nakon isteka vremena razvijanja*
- završno čišćenje



Slika 55. Shematski prikaz slijeda izvršavanja penetrantske kontrole [76]

Svojstva razvijača: [75, 76]

- Prilikom raspršivanja, razvijač mora biti bez kapljica i biti u obliku maglice te mora osigurati gladak, ravan i ravnomjeran sloj na površini.
- Razvijač mora imati zadovoljavajuću bjelinu kako bi se na ispitnoj površini stvorio dovoljni kontrast u odnosu na penetrant.
- Krupnoća praška razvijača direktno utječe na osjetljivost sustava – što su čestice sitnije te lakše penetriraju u procjepe što čini sustav osjetljivijim.

Svojstva penetranta: [75, 76]

- Običan penetrant gledan pod bijelim svjetlom može biti narančast, crven ili tamno crven.
- Fluorescentni penetrant se gleda pod „crnim“ živinim svjetlom koje fluorescira žuto-zeleno ili zeleno.

Zahtjevi / osjetljivosti / podjele: [75, 76]

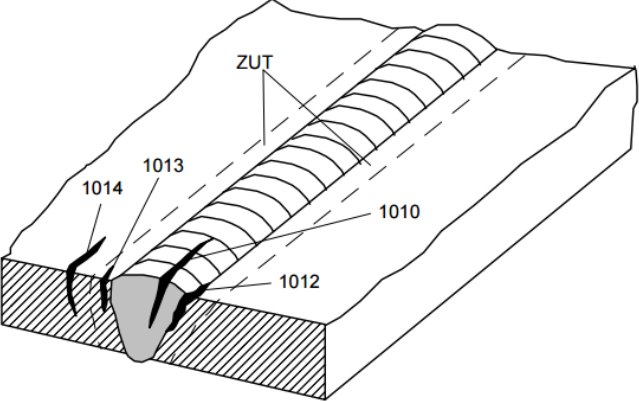
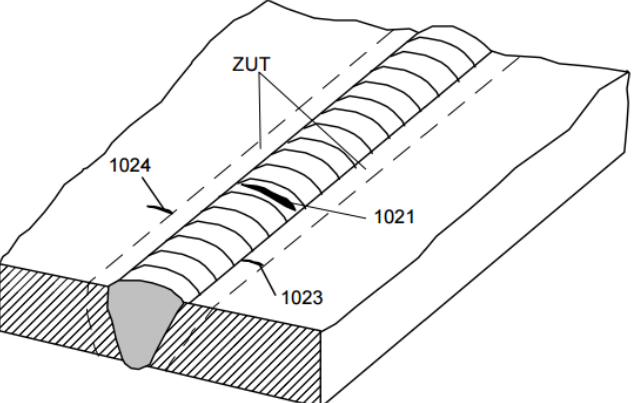
- HRN EN 571-1, HRN EN ISO 3452-2 i , HRN EN ISO 3452-3
- pukotine širine 1 m, dubine 10 m, duljine 100 m
- mjerimo duljinu linearnih indikacija, a ne stvarnu duljinu pronađenih linearnih nepravilnosti
- nije moguće određivati dubinu pukotine
- načini čišćenja površine:
 - mehanički, jetkanje, parno i kem. odmašćivanje, poliranje
 - oprez kod pjeskarenja i sačmarenja zbog grube i ne polirane površine
- uvjeti promatranja: (HRN EN ISO 3059)
 - obojeni: rasvjeta - min 500 lx;
 - fluorescentni: UV - min 1000 W/cm², max 20 lx
 - temperaturno područje primjene: 10 °C do 50 °C

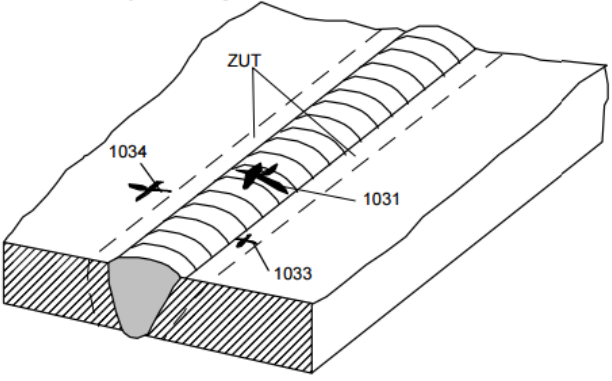
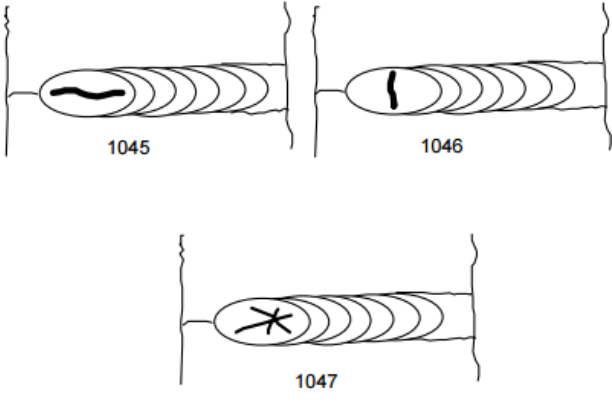
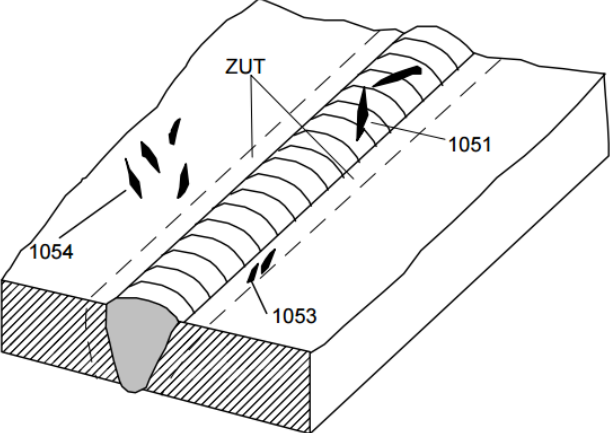


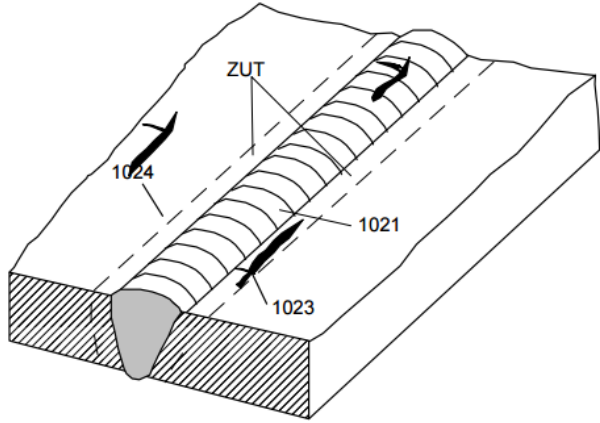
Slika 56. Ispitni uzorci s nanešenim penetrirajućim slojem [1]

Kategorizacija i klasifikacija pukotina je provedena prema normi HRN EN ISO 6520-1:2007 te su pronađene grupe opisane u dolje navedenim tablicama: [5, 77]

Tablica 19. Klasifikacija pukotina prema normi HRN EN ISO 6520-1:2007 [5, 77]

Oznake	Objašnjenje pogreške	Naziv i shematski prikaz greške
EN		
100	Diskontinuitet uslijed lokalnog loma koji može nastati kao posljedica utjecajem zavarivanja	Pukotine
1001	Pukotine s mikroskopskim dimenzijama	Mikropukotine
101 1011 1012 1013 1014	<p>Uzdužna pukotina:</p> <p>Glavni pravac poprečan s obzirom na os zavarenog spoja. Može se pronaći u :</p> <ul style="list-style-type: none"> - metalu zavora - na liniji staljivanja - zoni utjecaja topline - osnovnom metalu 	<p>Uzdužne pukotine</p> 
101 1021 1023 1024	<p>Uzdužna pukotina čiji je glavni pravac poprečan s obzirom na os zavarenog spoja. Može se pronaći u :</p> <ul style="list-style-type: none"> - metalu zavora, - zoni utjecaja topline - osnovnom metalu 	<p>Poprečne pukotine</p> 

Oznake	Objašnjenje pogreške	Naziv i shematski prikaz greške
EN		
103 1031 1032 1033	<p>Pukotine koje polaze iz iste točke i zrakasto se rasprostiru:</p> <ul style="list-style-type: none"> - U metalu zavora - U zoni utjecaja topline - U osnovnom metalu 	<p>Pukotine zvjezdastog oblika</p> 
104 1045 1046 1047	<p>Pukotina u završnom krateru:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uzdužno na zavar - Poprečno na zavar - Zvjezdasta 	<p>Pukotine u završnom krateru</p> 
105 1051 1053 1054	<p>Skupina odvojenih pukotina sa različitom orijentacijom i mogu se pronaći u :</p> <ul style="list-style-type: none"> - metalu zavora, - zoni utjecaja topline - osnovnom metalu 	<p>Pukotine u odvojenim skupinama</p> 

Oznake	Objašnjenje pogreške	Naziv i shematski prikaz greške
EN		
106	Skup međusobno povezanih pukotina s ishodištem iz iste točke. Treba ih razlikovati od grupe odvojenih pukotina 105 i pukotina zvjezdastog oblika 103.	Razgranate pukotine
1061	- U metalu zavara	
1063	- U zoni utjecaja topline	
1064	- U osnovnom metalu	

3.9. Rezultati ispitivanja – Varestraint metoda:

3.9.1. Varestraint varijanta 1:

Prva varijanta Varestraint metode je izrađena prema WPS FSB 2015/06 – 1, VM – V1, te je odabirom parametara zavarivanja i tehnikom rada dobiven zavareni spoj dimenzija: dužina 150 mm, širina 5 mm i visina 4 mm. Izgled zavarenog spoja zbog izražene konveksnosti, neproporcionalne visine zavora, niske razine penetracije i koncentracije naprezanja na samoj liniji staljivanja čini varijantu zavarenog spoja Varestraint 1 neprihvatljivim s aspekta dinamičke izdržljivosti.

Tablica 20. Parametri za zavarivanje korišteni za Varestraint varijantu 1 [1]

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1	135 MAG	1,2	130	22	DC impuls (+ pol)	4	300	0,5

Vizualnom kontrolom ustanovljeno je postojanje šest pukotina koje su bile preliminarno izmjerene, te je zatim provedena penetrantska kontrola gdje je provjeren cjelokupni zavareni spoj te su pronađene dodatne dvije pukotine koje bile vrlo zahtjevne za detektirati i izmjeriti vizualnom kontrolom zbog toga što su se nalazile uz samu liniju staljivanja, 1 mm iznad osnovnog materijala. Sveukupno je pronađeno osam pukotina.

- Makro lokacija na zavarenom spoju: Mjesto savijanja
- Mikro lokacija na zavarenom spoju: Bočne stijenke zavarenog spoja
- Orijentacija: Poprečno na smjer zavarivanja

Tablica 21. Popis i oznaka pukotina zabilježenih na Varestraint varijanti 1 [1]

Broj	Dužina	Oznaka pukotina
2	1.5 mm	1021
4	1.0 mm	1021
2	0.7 mm	1021



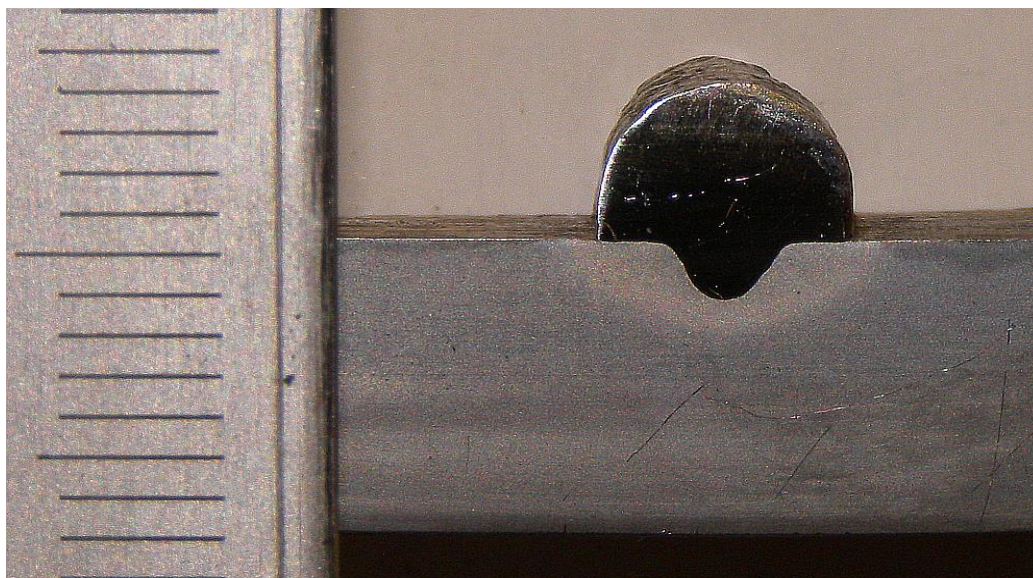
Slika 57. Ispitni zavar načinjen na površini uzorka, Varestraint varijanta 1 [1]



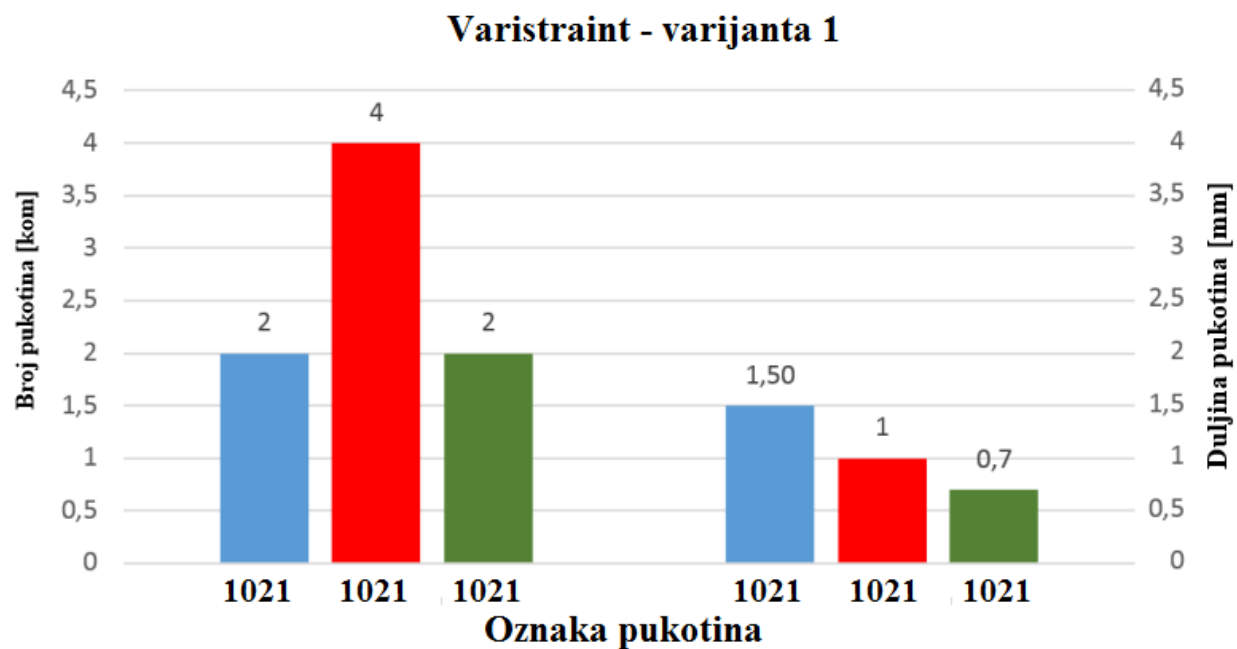
Slika 58. Nanošeni sloj razvijaača na površini uzorka, Varestraint varijanta 1 [1]



Slika 59. Uvećani prikaz mjesta nastanka pukotina, Varestraint varijanta 1 [1]



Slika 60. Makro izbrusak, Varestraint varijanta 1 [1]



Slika 61. Dijagrami načinjeni prema tablici 30, prikaz količine i dužine pukotina, Varestraint varijanta 1 [1]

3.9.2. Vareststraint varijanta 2:

Druga varijanta Vareststraint metode je izrađena prema WPS FSB 2015/06 – 1, VM – V2, te je odabirom parametara zavarivanja i tehnikom rada dobiven zavareni spoj dimenzija: dužina 150 mm, širina 8 mm i visina 4 mm. Oblik zavarenog spoja je zbog odabranih parametara manje izražene konveksnosti te je ujedno povoljnijeg izgleda s aspekta geometrijskih proporcija širine i visine.

Tablica 22. Parametri za zavarivanje korišteni za Vareststraint varijantu 2 [1]

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1	135 MAG	1,2	230	26	DC impuls (+ pol)	7	350	1,25

Nakon mjerenja je kao i kod prijašnje varijante provedeno čišćenje zavarenog spoja od prašine, troske i termalnih obojenja unutar zone utjecaja topline te je nakon toga napravljena vizualna kontrola kojom se pokušalo ustanoviti postojanje pukotina, njihov pojavni oblik i dimenzije te je nakon vizualne provedena kontrola penetrantima kako bi se provjerile i razlučile indikacije pukotina od lažnih indikacija.

Penetrantskom kontrolom je provjeren cjelokupni zavareni spoj te je ustanovljeno da su vizualnom kontrolom uspješno detektirano svih 8 pukotina. Najuočljivija razlika između varijante jedan i dva su dužina pukotina i raspodjela u zavarenom spoju. Na slikama 62, 63 i 64 ispod se može uočiti da je raspodjela pukotina orijentirana više prema tjemenu zavara nego što je blizu linije staljivanja kao što je to u slučaju prethodne varijante.

Vizualnom kontrolom ustanovljene su sljedeće pukotine:

- Makro lokacija na zavarenom spoju: Mjesto savijanja
- Mikro lokacija na zavarenom spoju: Bočne stijenke zavarenog spoja, izraženija propagacija pukotina prema tjemenu zavara s obzirom na varijantu jedan
- Orijentacija: Poprečno na smjer zavarivanja

Tablica 23. Popis i oznaka pukotina zabilježenih na Varestraint varijanti 2 [1]

Broj	Dužina	Oznaka pukotina
1	4.25 mm	1021
2	2.5 mm	1021
4	2.0 mm	1021
1	1.5 mm	1021



Slika 62. Ispitni zavar načinjen na površini uzorka, Varestraint varijanta 2 [1]



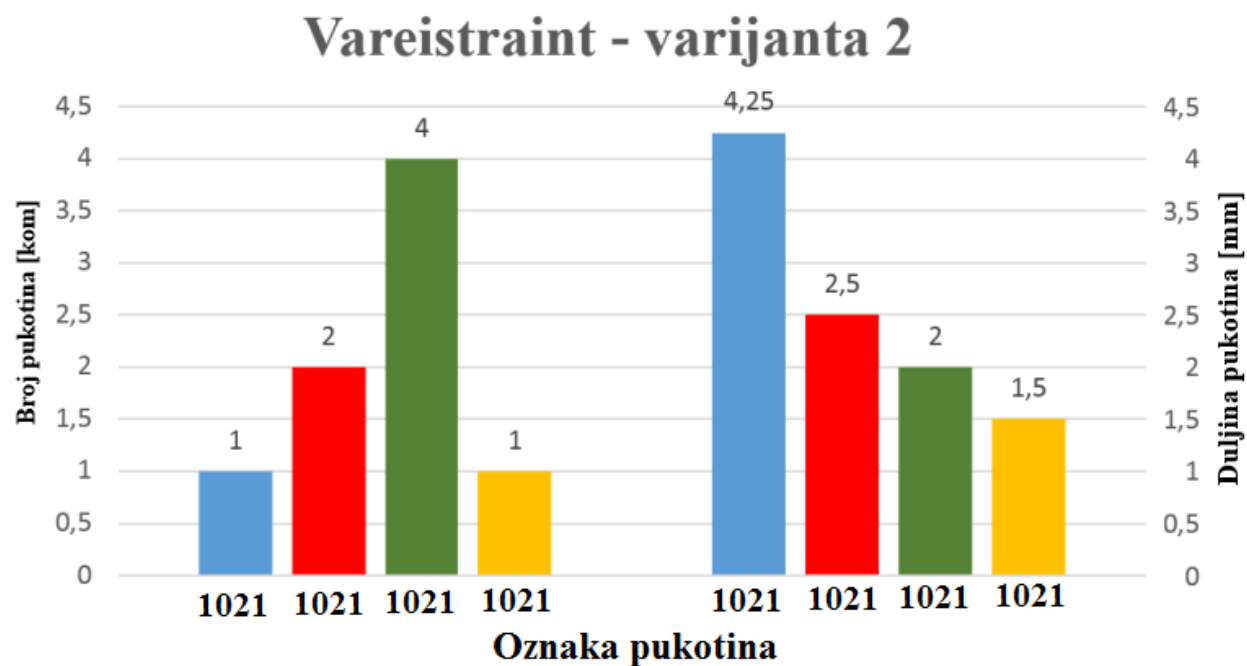
Slika 63. Nanešeni sloj razvijaa na površini uzorka, Varestraint varijanta 2 [1]



Slika 64. Uvećani prikaz mjesta nastanka pukotina, Varestraint varijanta 2 [1]



Slika 65. Makro izbrusak, Varestraint varijanta 2 [1]



Slika 66. Dijagrami načinjeni prema tablici 32, prikaz količine i dužine pukotina, Varestraint varijanta 2 [1]

3.9.3. Vareststraint varijanta 3:

Treća varijanta Vareststraint metode je izrađena prema WPS-u broj VM – V3, te je odabirom parametara zavarivanja i tehnikom rada dobiven zavareni spoj dimenzija: dužina 150 mm, širina 11 mm i visina 4 mm. Dodatnim povećanjem vrijednosti parametara se povećao i unos topline te je izgled zavarenog spoja bitno drugačiji. Dimenzije poput širine zavora i visina zavora te samo razlijevanje su povoljnije formirane te su uočene pukotine mnogobrojnije, ali znatno manjih dužina od prijašnje varijante postupka zavarivanja. Osim poprečnih pukotine, zabilježena je i kraterska pukotina – karakteristična topla pukotina koja nastaje uslijed nepravilno odabranih parametara zavarivanja, tehnike zavarivanja i odabira osnovnog i dodatnog materijala.

Tablica 24. Parametri za zavarivanje korišteni za Vareststraint varijantu 3 [1]

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1	135 MAG	1,2	320	34	DC impuls (+ pol)	11	390	2,15

Nakon mjerenja je kao i kod prijašnjih dviju varijanti provedeno čišćenje zavarenog spoja od prašine, troske i termalnih obojenja unutar zone utjecaja topline te je nakon toga napravljena vizualna kontrola kojom se potvrdio broj i dužina pukotina, njihov pojavni oblik i dimenzije. Nakon vizualne provedena kontrola penetrantima kako bi se provjerile i razlučile indikacije pukotina od lažnih indikacija. U trećoj varijanti postupka, sve pukotine su bile vidljive golim okom te su dodatno potvrđene, kategorizirane i popisane u tablici 34.

Vizualnom kontrolom ustanovljene su sljedeće pukotine:

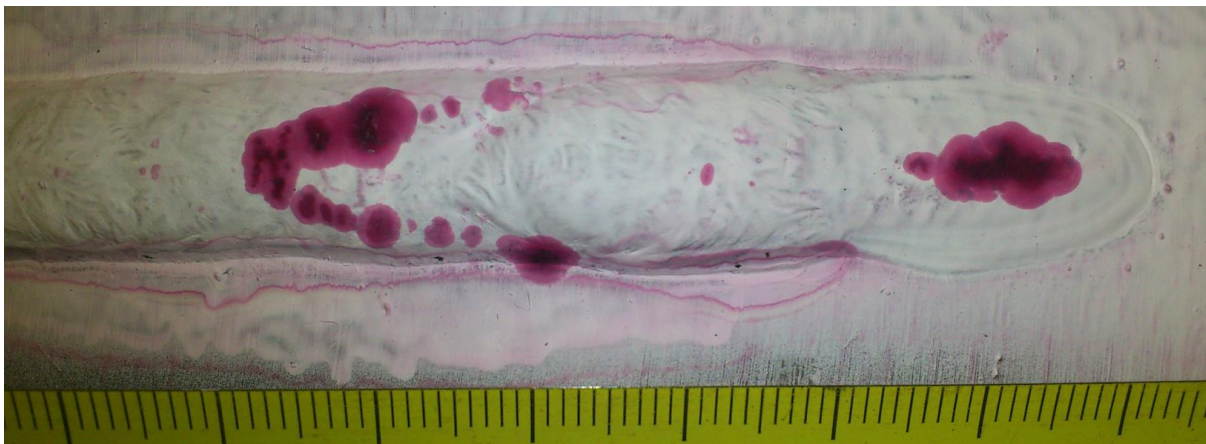
- Makro lokacija na zavarenom spoju: Mjesto savijanja
- Mikro lokacija na zavarenom spoju: Bočne stijenke i završni krater zavarenog spoja
- Orijentacija: Poprečno na smjer zavarivanja, zvjezdasta pukotina u završnom krateru
- Broj i dužina pukotina:
 - 4 pukotine dužine 3.0 mm
 - 3 pukotine dužine 1.5 mm
 - 7 pukotina dužine 2 mm
 - 1 kraterska pukotina zvjezdastog oblika uzdužne duljine 4 mm i poprečne duljine 4.5 mm

Tablica 25. Popis i oznaka pukotina zabilježenih na Varestraint varijanti 3 [1]

Broj	Dužina	Oznaka pukotina
4	3.0 mm	1021
3	1.5 mm	1021
7	2.0 mm	1021
1	4.5 mm	1047



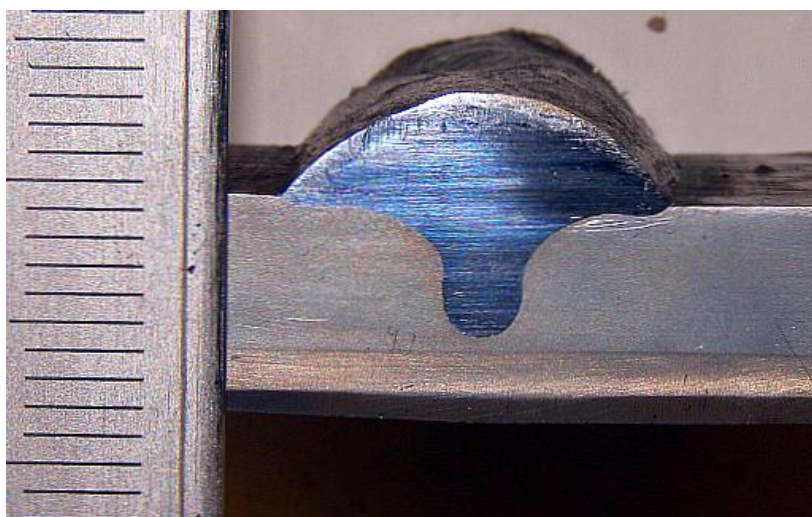
Slika 67. Ispitni zavar načinjen na površini uzorka, Varestraint varijana 3 [1]



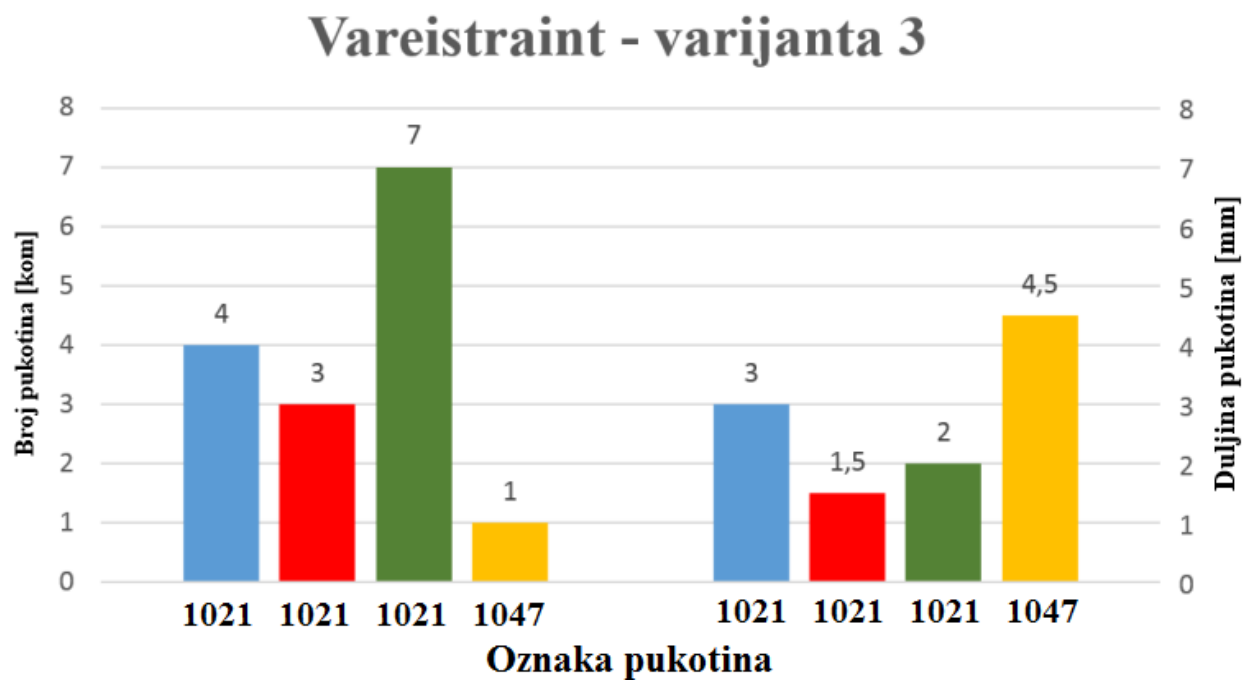
Slika 68. Nanešeni sloj razvijaa na površini uzorka, Varestraint varijanta 3 [1]



Slika 69. Uvećani prikaz mjesta nastanka pukotina, Varestraint varijanta 3 [1]



Slika 70. Makro izbrusak, Varestraint varijanta 3 [1]



Slika 71. Dijagrami načinjeni prema tablici 34, prikaz količine i dužine pukotina, Varestraint varijanta 3 [1]

3.10. Rezultati ispitivanja – Samoukrućeni T-spoj metoda:

3.10.1. Samoukrućeni T-spoj varijanta 1:

Tijekom radne probe, ustanovljeno je da je za podešene parametre ponašanje taline nepravilno te da je također nepravilnom tehnikom rada uspostavljen eliptičan oblik taline kojim se uspješno izazvala inicijacija toplih pukotina. Mnogobrojne radne probe dovele su to parametara navedenih u tablici 34 kao kritični parametri nakon kojih nastaju pukotine, te se za praktičnu primjenu ne preporučuju.

Izgled zavarenog spoja je s aspekta konveksnosti povoljnog izgleda, ali je zbog nestacionarnih uvjeta koji vladaju prilikom gašenja električnog luka, područje prije završnog kratera vrlo nepovoljnog izgleda jer rastaljeni materijal nije u potpunosti obuhvatio obje površine ispitnih uzoraka. Na lokaciji gdje se nalazi najviše grešaka, mogućnost inicijacije pukotina raste te su sljedeći parametri ključni čimbenici:

- Greške prilikom spajanja radnih komada
- Kontrolirani unos nečistoća u obliku sumpora
- Uvjeti uklještenja kutnog spoja
- Nestacionarni uvjeti električnog luka odnosno unosa topline
- Nepravilno ponašanje i neodgovarajući izgled taline

Tablica 26. Popis i kategorizacija pukotina zabilježenih na T-spoj varijanti 1 [1]

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1	135 MAG	1,2	130	22	DC impuls (+ pol)	4	300	0,5

Nakon procesa zavarivanja je zavareni spoj grubo očišćen od prašine, troske i toplinskih obojenja kako bi se provela vizualna kontrola u svrhu otkrivanja toplih pukotina. Prvom vizualnom kontrolom je ustanovljeno da se pukotine rasprostranjene isključivo u kritičnom području prije završnog kratera zavarenog spoja gdje se javljaju nestacionarni uvjeti u vidu ponašanja električnog luka.

Kontrola penetrantima je provedena u skladu s normom HRN EN ISO 3452-2 te je ustanovljeno da se nalazi sveukupno pet pukotina različitih orijentacija, dužina i pretpostavljenih dubina. Dodatna je vizualna kontrola napravljena nakon penetrantske kako bi se ustanovile i razlučile indikacije pravih pukotina od lažnih indikacija.

Vizualnom kontrolom ustanovljene su sljedeće pukotine:

- Makro lokacija na zavarenom spoju: Područje prije završnog kratera
- Mikro lokacija na zavarenom spoju: Bočne stijenke i tjeme zavarenog spoja
- Orijentacija: Poprečno i uzdužno s obzirom na smjer zavarivanja
- Broj i dužina pukotina:

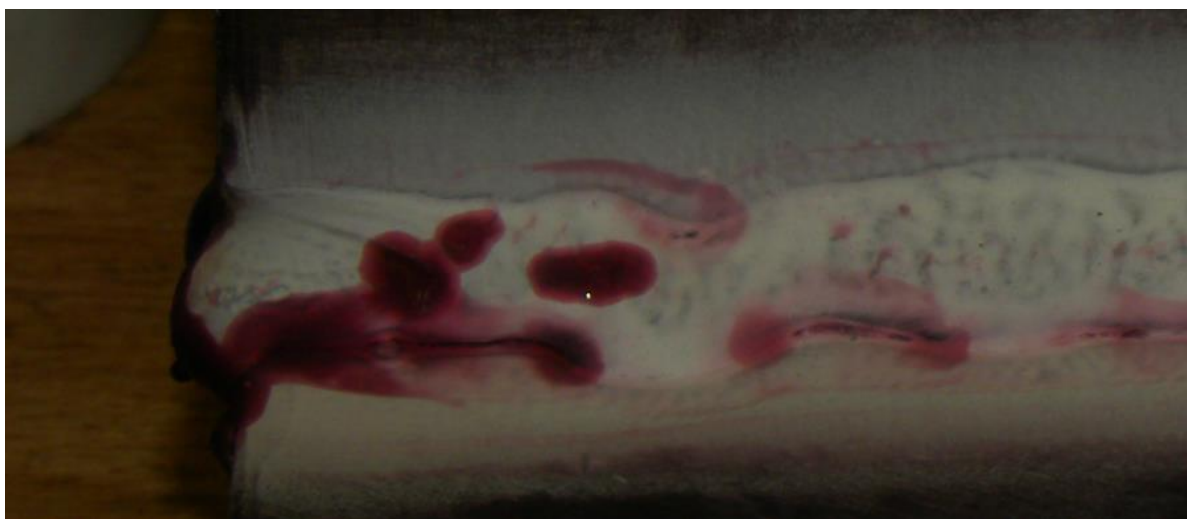
Tablica 27. Popis i oznaka pukotina zabilježenih na kutni spoj varijanti 1 [1]

Broj	Dužina	Oznaka pukotina
2	2.5 mm	1051
1	1.5 mm	1021
2	1.0 mm	1051

Na slikama dolje je prikazan uvećan kutni gdje se mogu uočiti pukotine nastale poprečno na smjer pružanja zavora.

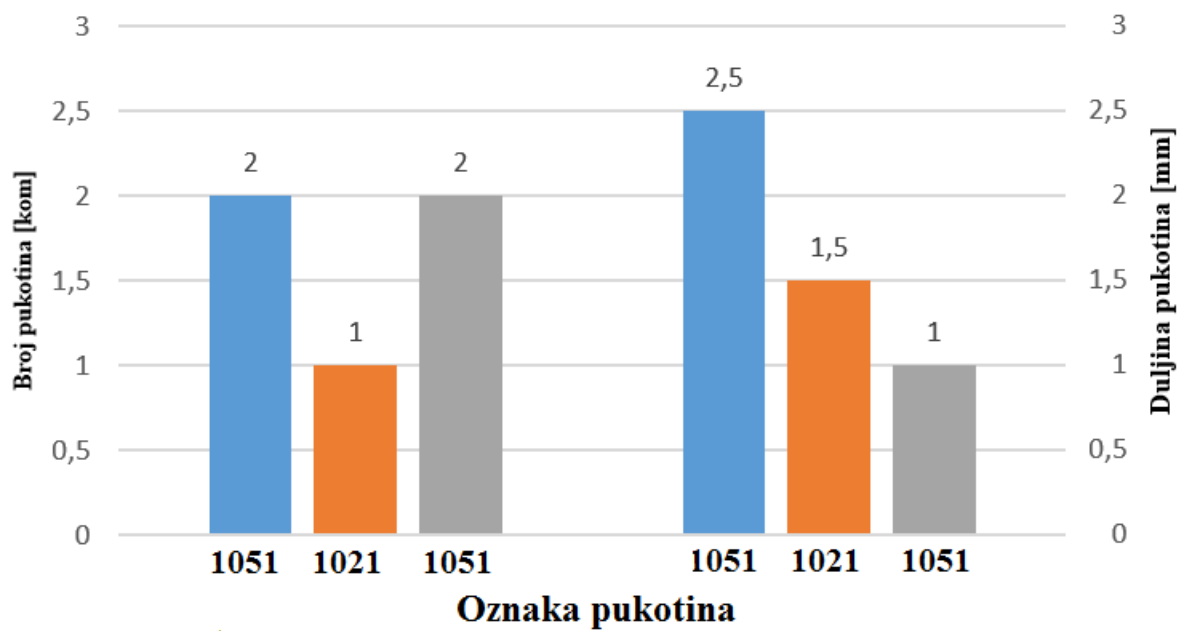


Slika 72. Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavora, T-spoj varijanta 1 [1]

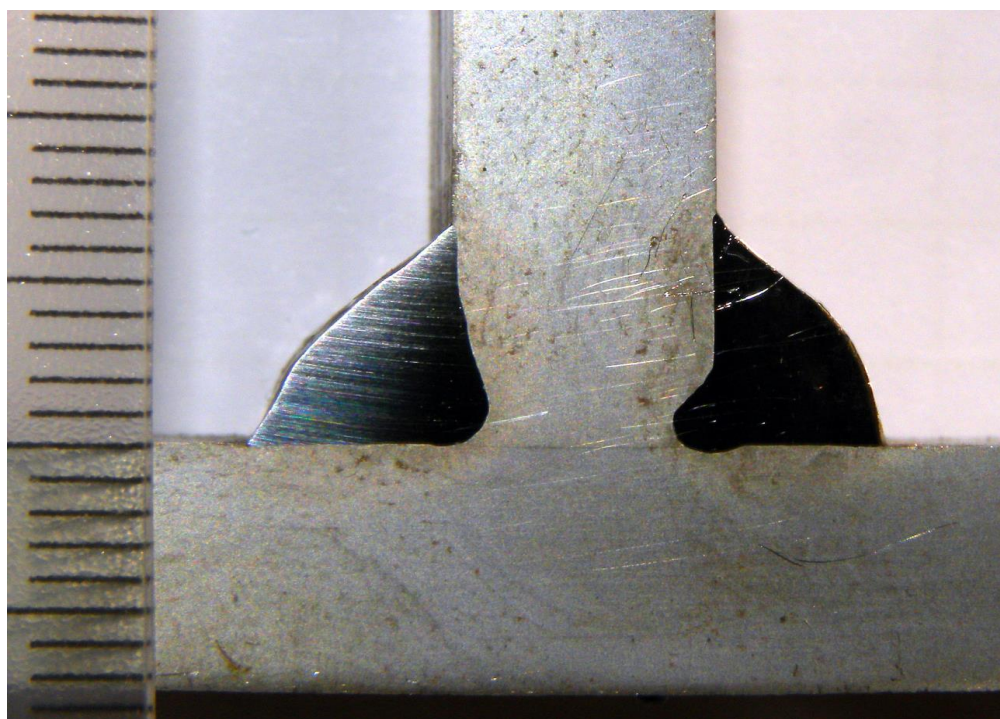


Slika 73. Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavora kontroliranog penetrantima, T-spoj varijanta 1
[1]

T-spoj - varijanta 1



Slika 74. Dijagrami načinjeni prema tablici 36, prikaz količine i dužine pukotina, kutni spoj varijanta 1 [1]



Slika 75. Makro izbrusak, kutni spoj varijanta 1 [1]

3.10.2. Samoukrućeni T-spoj varijanta 2:

Izgled zavarenog spoja je idealniji nego u prethodnoj varijanti što ukazuje na povoljniji odabir parametara zavarivanja, ali je zbog brzine izvođenja spoja, nečistoća i uvjeta uklještenja ipak došlo do izazivanja toplih pukotina. Radnim je probama napravljeno ispitivanje parametara kako bi se ustanovila najnepovoljnija brzina zavarivanja te koja je kritična vrijednost napona luka što utječe na širinu zavarenog spoja te ujedno geometriju zavarenog spoja. Ovisno o geometriji će nečistoće biti koncentrirane na različitim dijelovima zavarenog spoja te su tijekom zavarivanja varijante 2 inicirane solidifikacijske pukotine nastale uslijed stvaranja niskotaljivih sulfidnih faza koncentriranih uzdužno na tjemenu zavora.

Odabrani su parametri prema specifikaciji procesa zavarivanja imena TM-V2. Najvažniji parametri su prikazani u tablici ispod:

Tablica 28. Popis i kategorizacija pukotina zabilježenih na T-spoj varijanti 2 [1]

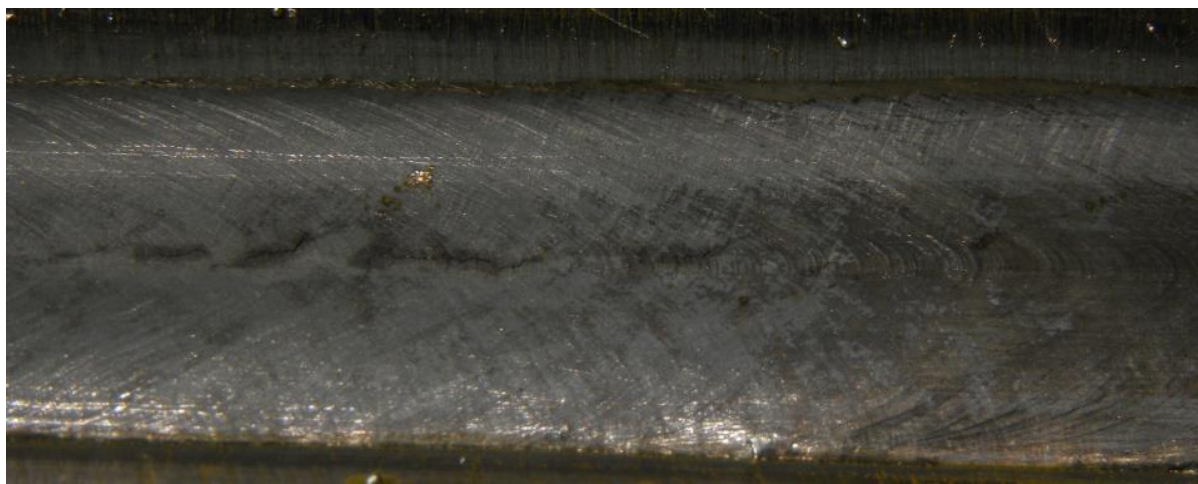
Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1	135 MAG	1,2	230	26	DC impuls (+ pol)	7	350	1,25

Zavareni spoj je podvrgnut vizualnoj kontroli gdje su uočene solidifikacijske pukotine na tjemenu zavora te je ukupno prebrojeno sedam pukotina uzdužne orijentirane to jest u smjeru pružanja zavarenog spoja. Provedena penetrantska kontrola je potvrdila postojanje sedam pukotina te se na slikama 76 i 77 može uočiti niz uzdužnih isprekidanih pukotina na tjemenu zavarenog spoja.

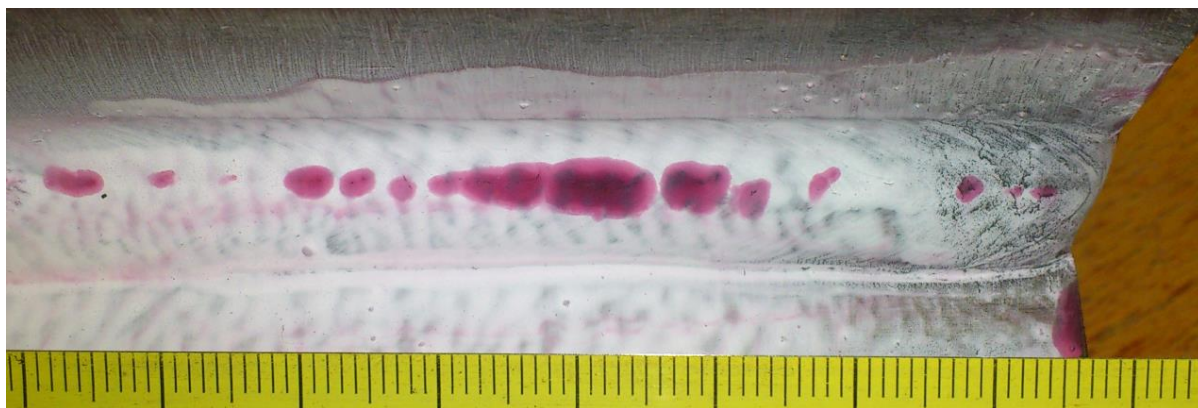
- Makro lokacija na zavarenom spoju: Početak zavarenog spoja
- Mikro lokacija na zavarenom spoju: Tjeme zavarenog spoja
- Orijentacija: Uzdužno s obzirom na smjer zavarivanja
- Broj i dužina pukotina:
 - 1 pukotina dužine 3.5 mm
 - 6 pukotina dužine 1.5 mm

Tablica 29. Popis i oznaka pukotina zabilježenih na kutni spoj varijanti 2 [1]

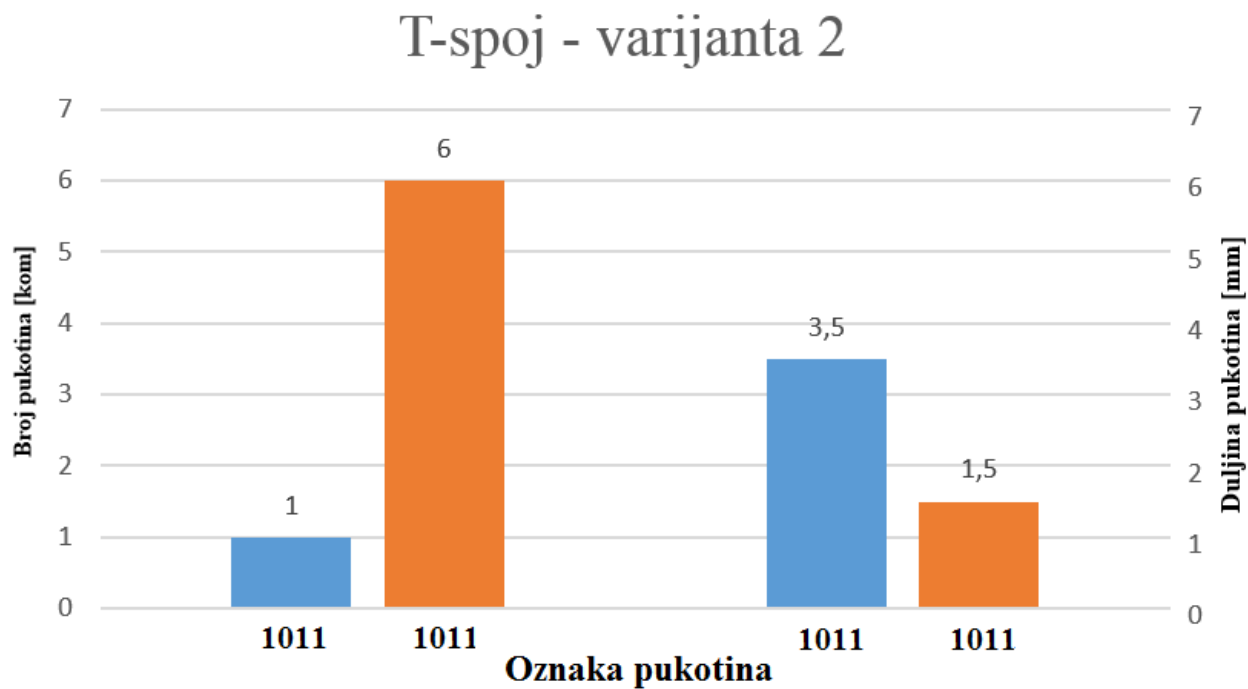
Broj	Dužina	Oznaka pukotina
1	3.5 mm	1011
6	1.5 mm	1011



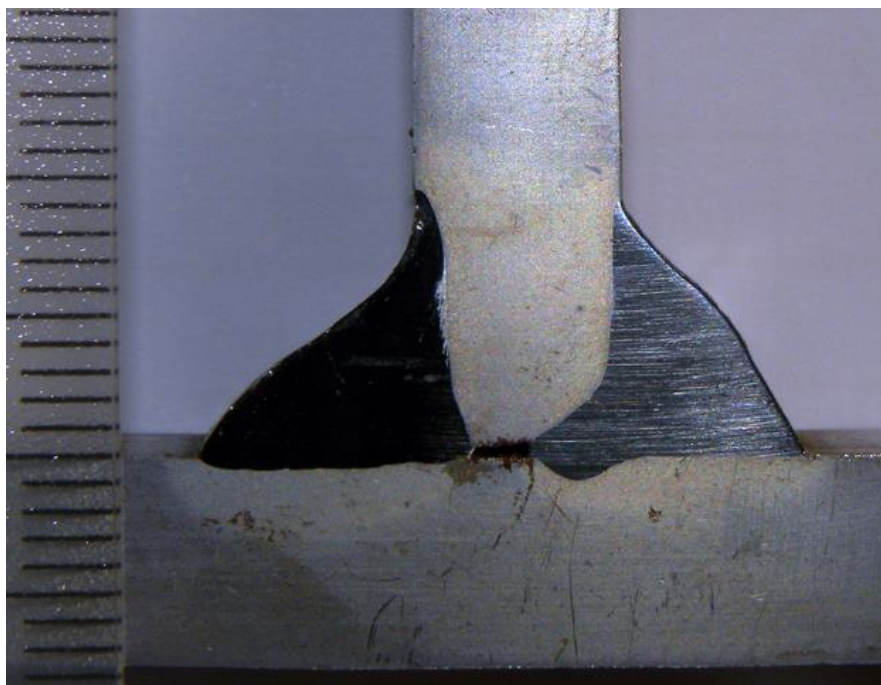
Slika 76. Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavora, T-spoj varijanta 2 [1]



Slika 77. Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavora kontroliranog penetrantskom metodom, T-spoj varijanta 2 [1]



Slika 78. Dijagrami načinjeni prema tablici 38, prikaz količine i dužine pukotina, kutni spoj varijanta 2 [1]



Slika 79. Makro izbrusak, kutni spoj varijanta 2 [1]

3.10.3. Samoukrućeni T-spoj varijanta 3:

Treća varijanta ispitivanja kutnog spoja je proizvela zavareni spoj prihvatljive geometrije i s potpunim protaljivanjem. Odabir parametara je vršen nizom radnih proba kako bi se ustanovila kritična brzina za stvaranje toplih pukotina. Tijekom radnih proba nije uočeno stvaranje uzdužnih pukotina na tjemenu zavarenog spoja osim što je uočeno stvaranje uzdužne pukotine unutar završnog kratera. Uočeno je da je pukotina nastala nakon više radnih proba gdje je brzina zavarivanja bila prevelika te je time bio postignut jedan od uvjeta za nastanak toplih pukotina – eliptičan izgled taline. Zbog eliptičnosti i zbog nemogućnosti popunjavanja završnog kratera, niskotaljive sulfidne faze ispoljene na sredini zavara su uz naprezanja izazvana uklještenjem koje nije dopustilo pravilno skupljanje metala zavara uzrokovale inicijaciju pukotina tijekom hlađenja.

Odabrani su parametri prema specifikaciji procesa zavarivanja imena TM-V3. Najvažniji parametri su prikazani u tablici ispod:

Tablica 30. Popis i kategorizacija pukotina zabilježenih na T-spoj varijanti 3 [1]

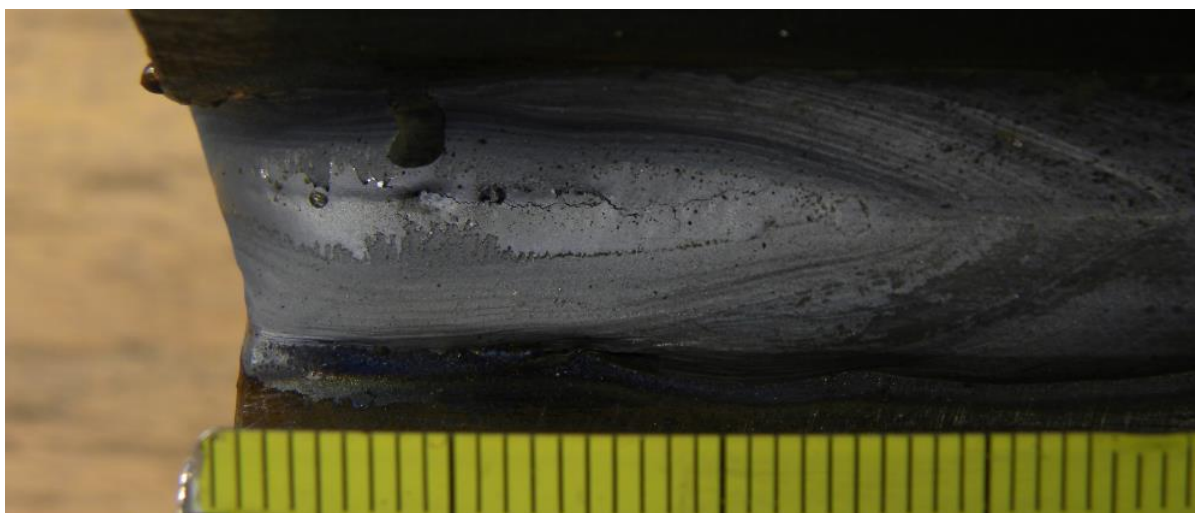
Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1	135 MAG	1,2	320	34	DC impuls (+ pol)	11	390	2,15

Nakon zavarivanja, provedena je vizualna kontrola gdje je uočena i izmjerena kraterska solidifikacijska pukotina koja se protezala uzduž završnog kratera. Provedena penetrantska kontrola je potvrdila nalaz vizualne kontrole te se na slikama 80 i 81 može uočiti kraterska pukotina.

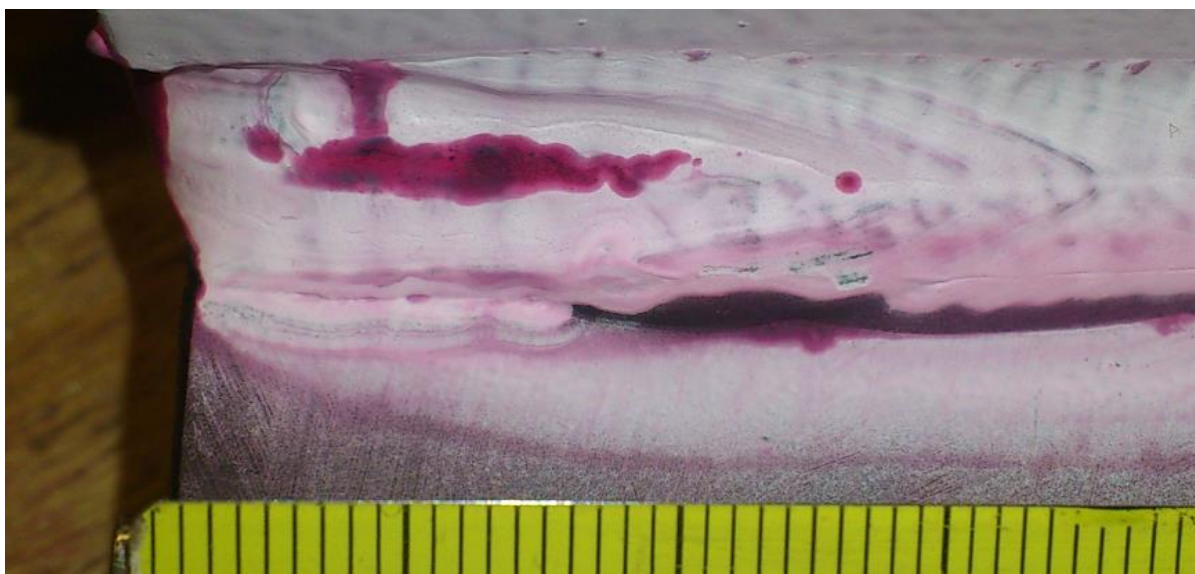
- Makro lokacija na zavarenom spoju: Završetak zavarenog spoja
- Mikro lokacija na zavarenom spoju: Završni krater zavarenog spoja
- Orijentacija: Uzdužna pukotina
- Broj i dužina pukotina:
 - 1 pukotina dužine 14.5 mm

Tablica 31. Popis i oznaka pukotina zabilježenih na kutni spoj varijanti 3 [1]

Broj	Dužina	Oznaka pukotina
1	14.5 mm	1045

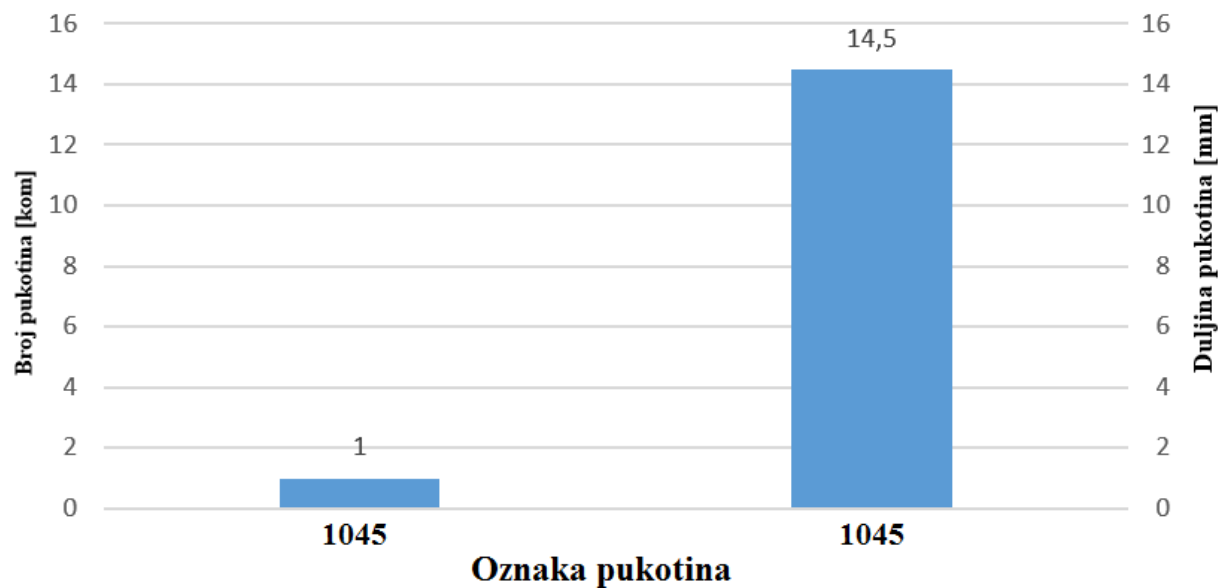


Slika 80. Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavora, T-spoj varijanta 3 [1]



Slika 81. Uvećani prikaz ispitnog kutnog zavora kontroliranog penetrantkom metodom, T-spoj varijanta 3 [1]

T-SPOJ - Varijanta 3



Slika 82. Dijagrami načinjeni prema tablici 40. omjeri količine i dužine pukotina, kutni spoj varijanta 3 [1]

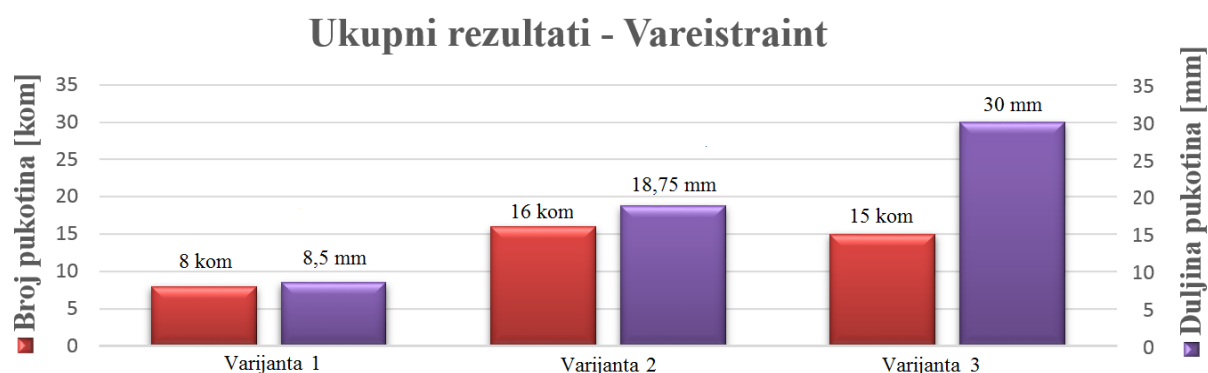


Slika 83. Makro izbrusak, kutni spoj varijanta 3 [1]

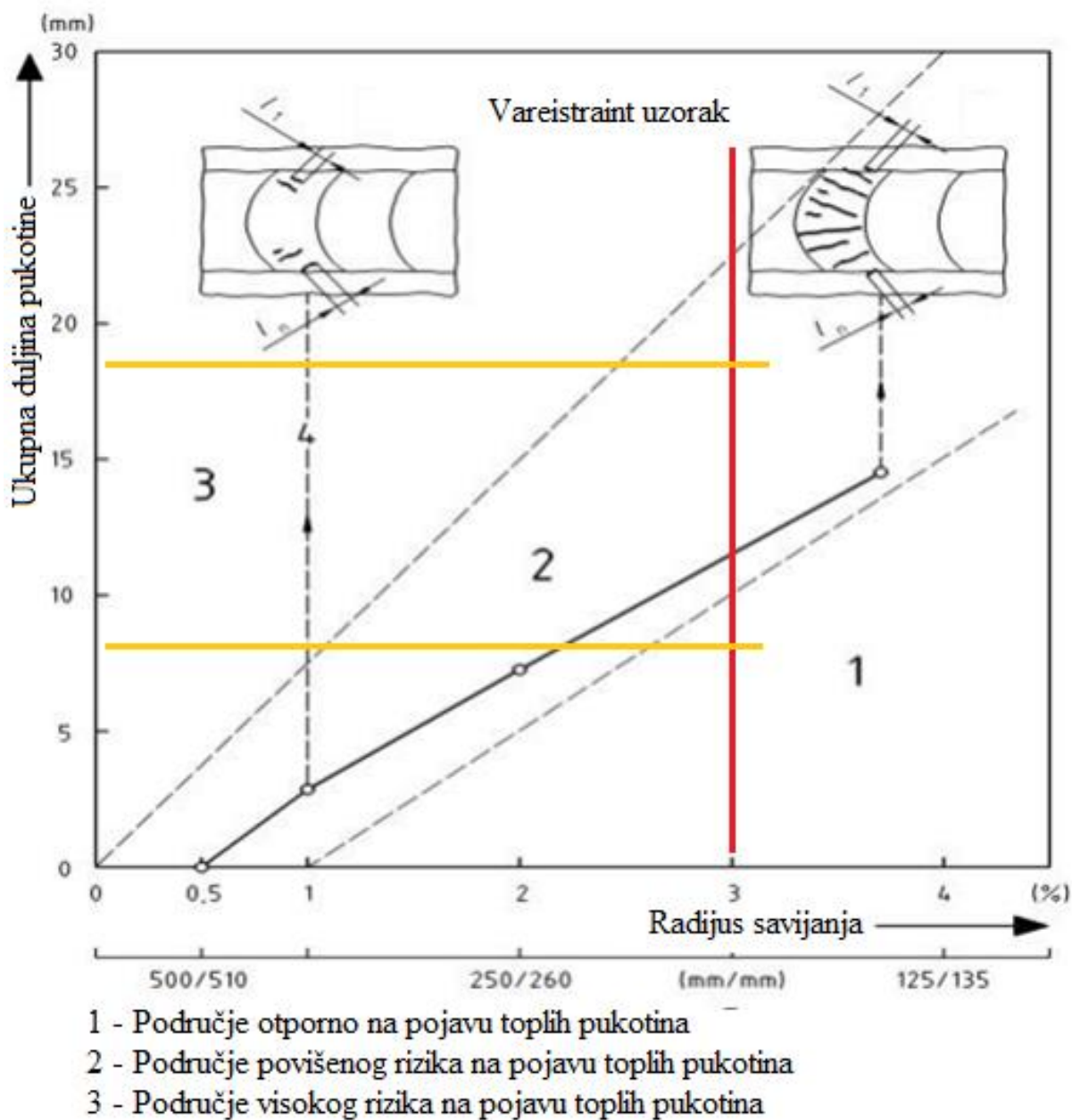
3.11. Ukupni rezultati ispitivanja:

Kako bi se dobio bolji uvid u sklonost materijala pucanju, predloženi dijagrami na slikama 84 i 86. Prema grafički prikazanim podacima na slici 84 i graničnim područjima rizika od pukotina definiranim prema normi HRN EN ISO 17641 -3:2003 na slici 84.

- Prva varijanta Varestraint: područje 1 – područje otpornosti ili vrlo niskog rizika od nastanka toplih pukotina
- Druga varijanta Varestraint: područje 2 – područje povišenog rizika od nastanka toplih pukotina
- Treća varijanta Varestraint: područje 3 – područje visokog rizika od nastanka toplih pukotina

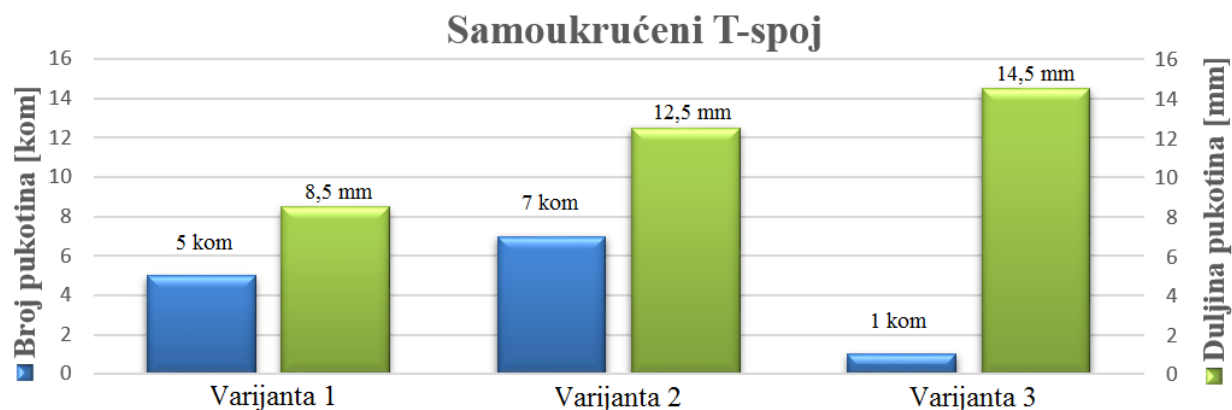


Slika 84. Dijagram omjera broja i duljine pukotina za Varestraint ispitivanje [1]



Slika 85. Granična područja rizika od nastajanja toplih pukotina, definirani prema normi HRN EN ISO 17614 -3:2003 [67]

Mjerodavna norma za ispitivanje otpornosti na tople pukotine pomoću kutnog spoja je dana prema normi HRN EN ISO 17614 -2:2003 gdje nema definiranih granica kojima bi se moglo odrediti atribut otpornosti prema nastanku toplih pukotina, osim izvještaja kojim popisuje broj i duljina grešaka kao što je prikazano na slici 86.



Slika 86. Dijagram omjera broja i duljine pukotina za kutni spoj ispitivanje [1]

4. ZAKLJUČAK:

U skladu sa ciljevima postavljenim na početku diplomskog rada, najprije je provedena analiza metalurških svojstava čelika sa aspekta zavarljivosti. U eksperimentalom dijelu je provedeno ispitivanje sklonosti konstrukcijskog čelika kao osnovnog materijala, zavarenog sa visokolegiranim nehrđajućim čelikom kao dodatnim materijalom ka toplim pukotinama. Kako bi se simulirali nekontrolirani uvjeti izvan laboratorija, dodan je sumpor u težini od 1 miligram u svaki ispitni zavar.

Kao ispitne metode za sklonost čelika S355 NL prema toplim pukotinama, odabrane su: Varestraint metoda za ispitivanje sklonosti zavarenog spoja prema nastaku likvacijskih toplih pukotina i samouklješteni T-spoj metoda za ispitivanje sklonosti zavarenog spoja prema nastanku solidifikacijskih toplih pukotina.

Zabilježeni rezultati pokazuju da se tijekom zavarivanja probnih uzoraka nije manifestirala niti jedna topla pukotina usljed korištenja parametara za zavarivanje preporučenim od strane nastavnog i zavarivačko osoblja. Tople pukotine su se manifestirale tek tijekom zavarivanja ispitnih zavora sa proizvoljno određenim parametrima za zavarivanje, a težilo se tome da se pronađu kritični parametri pri kojima se prvi puta javljaju tople pukotine.

S povećanjem vrijednosti proizvoljnih parametara, zabilježen je porast broja i ukupne duljine toplih pukotina. Duljine pukotina dobivene Varestraint ispitivanjima su rasle sa povećanjem vrijednosti parametara za zavarivanje, dok je broj pukotina porastao do veličine navedene u rezultatima i ostao približno jednak. Rezultati dobiveni ispitivanjem samoukružujućem T-spoju metodi se relativno podudaraju sa rezultatima dobivenima Varestraint metodom ispitivanja. Ukupna duljina pukotina raste povećanjem vrijednosti parametara, ali se za razliku od Varestraint metode, pojavni oblik pukotina mijenja.

Samouklješteni T-spoj metoda ispitivanja se pokazala kao najprikladnija metoda za određivanje sklonosti prema nastanku solidifikacijskih toplih pukotina koje mogu biti izazvane stvarnim uvjetima koji se javljaju tijekom izrade zavarenog spoja u praktičnoj primjeni.

Kao prijedlog za daljnja istraživanja, korisno bi bilo posjedovati sustav – bazu podataka kojom bi se studenti mogli koristiti kao temeljem za učenje i istraživanje područja zavarljivosti. Sa navedenim sustavom čija je shema zadana u uvodu diplomskog rada, teži se povećati razina znanja i razumijevanja mnogobrojnih problematika zavarljivosti materijala kako bi se izučili što kvalitetniji i profesionalniji inženjeri zavarivanja.

5. LITERATURA:

- [1] Vlastita arhiva
- [2] TR/ISO 581: 2005
- [3] HRN EN ISO 15608: 2006
- [4] TR/ISO 20172: 2005
- [5] Juraga, Ljubić, Živčić, Pogreške u zavarenim spojevima, HDTZ, Zagreb, 2007.
- [6] Hrivnjak I. Zavarljivost čelika, Građevinski fakultet Beograd, Beograd, 1982.
- [7] Živčić, MIG/MAG zavarivanje, HDTZ, 1986.
- [8] Padhy G.K., Komizo Yu-Ichi, Diffusible Hydrogen in Steel Weldment, Osaka University, Osaka, 2013.
- [9] Lancaster J.F., Metallurgy of Welding, Cambridge University, Cambridge, 1999.
- [10] Weldment Distortion, Welding Handbook, Lincoln Electric.
- [11] K. Sindo, Welding Metallurgy, University of Wisconsin, 2003.
- [12] Z. Lukačević, Zavarivanje. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [13] Omer W. Blodgett, Controlling Distortion In Design, Welding Magazine, 2007.
- [14] Milan Živčić, Sprečavanje i toplinsko ravnanje deformacija na zavarenim konstrukcijama, HDTZ, Zagreb 1986.
- [15] C.G.Interrante, G.M. Pressouyre, Current Solutions to Hydrogen Problems in Steel, ASM, 1982. Washington DC, 3 – 16
- [16] Omer W. Blogett, Design of Welded Structures, Cleveland - Ohio, 1991.
- [17] A.C. Davies, The Science and Practice of Welding, Cambridge University Press, 1975.
- [18] Malina J., Malina M., A. Begić Hadžipašić, Utjecaj vodika na krhkost modernih konstrukcijskih čelika dobivenih na CSP – postrojenju, Metalurški fakultet, 2009.
- [19]: HRN EN ISO 2560: 2006
- [20] American Welding Society Enciklopedija, Svezak 1, 9. izdanje, 1983.
- [21]: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9547> ; 12.04.2015
- [22]: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Aging+of+Metals> ; 12.04.2015
- [23] Corić, Filetin, Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2011.

- [24] M. Novosel, D. Krumes: Posebni čelici, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [25]: <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/nisko.html> ; 15.04.2015
- [26]: <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/neleg.html> ; 15.04.2015
- [27] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [28] Juraga, I., Tivčić, M., Gracin, M. ; Reparturno zavarivanje, Vlastita naklada, Zagreb, 1994
- [29]: <http://www.birlesikmetal.eu/Technical-Datas/Technical-Datas/Effect-Of-Alloy-Elements> ; 18.04.2015.
- [30] Gojić, M. ; Tehnike spajanja i razdvajanja, Metalurški fakultet, Sisak, 2003
- [31] Math M.: Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [32]: <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf> ; 20.04.2015.
- [33] Matković F., Matković P., Fizikalna metalurgija I, Sisak, 2009.
- [34] American Welding Society Enciklopedija, Svezak 4, 7. izdanje, 1984.
- [35] Bollinghaus T., Horst H., Hot cracking phenomena in welds, 2005.
- [36] Blondeau R., Metallurgy and Mechanics of Welding, 2001.
- [37] Repair and Maintenance Welding Handbook, Esab AB, Goteborg, Sweden
- [38]: <http://www.j4stainless.com/bahasa/images/chromiumoxide.jpg> ; 21.04.2015. ; 21:10
- [39]: http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/06_%20Weldability%20and%20defects%20in%20weldments.pdf ; 21.04.2015. ; 22:48
- [40]: <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/casting/microsegregation.php> 21.04.2015. ; 23:44
- [41]: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1976_07_s181.pdf 21.04.2015. ; 23:53
- [42]: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=microsegregation> ; 22.04.2015. ; 00:21
- [43]: [https://www.ualberta.ca/~hhenein/Materials%20Science%20and%20Engineering%20Technology%2041\(7\)%20\(2010\)%20pp%20555-561.pdf](https://www.ualberta.ca/~hhenein/Materials%20Science%20and%20Engineering%20Technology%2041(7)%20(2010)%20pp%20555-561.pdf) 25.04.2015. ; 11:01
- [44]: <http://www.weldpedia.com/2014/08/solid-inclusions-that-impair-weld.html>; 25.04.2015.
- [45]: http://lib.znate.ru/pars_docs/refs/108/107610/107610_html_m694dd327.png; 25.04.2015.

- [46]: <https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/anisotropy.htm> ; 28.04.2015.
- [47]: <http://www.newagepublishers.com/samplechapter/001425.pdf> ; 28.04.2015.
- [48]: <http://www.pt.ntu.edu.tw/hmchai/Biomechanics/BMmaterial/Bone.files/AnisotropyGraph.jpg> ; 28.04.2015.
- [49]: [http://materion.com/~media/Files/PDFs/Alloy/Newsletters/Technical%20Tidbits/Is;](http://materion.com/~media/Files/PDFs/Alloy/Newsletters/Technical%20Tidbits/Is;29.04.2015) 29.04.2015.
- [50]: https://www.microscopeworld.com/t-astm_e112_grain_counting_reticles.aspx; 28.04.2015.
- [51] M. Maalekian: The Effects of Alloying Elements on Steels (I), Christian Doppler Laboratory for Early Stages of Precipitation, Institut für Werkstoffkunde, Schweißtechnik und Spanlose Formgebungsverfahren, Technische Universität, Graz, 2007.
- [52]: <http://vanitec.org/wp-content/uploads/2011/09/The-Effect-of-Microalloying-on-HAZ-Toughness.pdf>; 30.04.2015.
- [53]: <http://www.stainlessfoundry.com/PostWeld.asp> ; 30.04.2015.
- [54]: <http://en.wikipedia.org/wiki/Electronegativity> ; 02.05.2015.
- [55]: <http://en.bodamaterials.com/imageRepository/61fadfd5-956a-49a3-addb-c1ff2d01819b.jpg> ; 02.05.2015.
- [56]: <http://australianmuseum.net.au/image/crystal-group-2-orthorhombic-pyramid>; 02.05.2015.
- [57]: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:54604/FULLTEXT01.pdf> ; 02.05.2015.
- [58] http://www.ssab.com/Global/SSAB/SSAB_Americas/en/020_SSAB%20Wear%20Solutions_Chromium%20Carbide%20Overlay%20Plate%20datasheet.pdf ; 04.05.2015.
- [59]: <http://www.welding-alloys.com/products-services/wa-welding-consumables/hardfacing-cored-wires/anti-abrasion/hardface-tic.html> ; 04.05.2015.
- [60]: http://en.wikipedia.org/wiki/Chromium_carbide ; 04.05.2015.
- [61]: http://www.tedpella.com/company_html/hardness.htm ; 04.05.2015.
- [62]: <http://www.welding-alloys.com/products-services/surface-protection-products-services-wa-integra/tuffplate-wear-plate-against-impact-and-abrasion.html> ; 04.05.2015.
- [63]: <http://met-tech.com/preheater-tube-failure.html> ; 04.05.2015.

- [64]: http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_carbide#/media/File:TiC-xtal-3D-vdW.png; 04.05.2015.
- [65] Totten G.E., Handbook of Mechanical Alloy Design; 04.05.2015.
- [66]: HRN EN ISO 17641 -1 :2003, 17641 -2 :2003, 17641 -3 :2003
- [67]: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242013000400003&script=sci_arttext ; 21.06.2015.
- [68]: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022> ; 21.06.2015.
- [69]: <http://www.westyorkssteel.com/carbon-steel/s355/> ; 22.06.2015.
- [70]: <http://www.amptek.com/xrf/> ; 22.06.2015.
- [71]: http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-BlueMax-BlueMaxMIG309LSi/c61012.pdf ; 24.06.2015.
- [72]: <http://www.elektroda-zagreb.hr/proizvodi/zice.html> ; 24.06.2015.
- [73]: <http://pinnaclealloys.com/wp-content/uploads/Pinnacle-Alloys-ER309LSi.pdf>; 24.06.2015.
- [74]: <http://www.directindustry.com/prod/olympus/product-17434-866275.html>; 26.05.2015.
- [75]: <http://www.oxford-instruments.com/products/spectrometers/x-ray-fluorescence-analyzer> 28.06.2015.
- [76]: <http://www.steel-grades.com/Steel-grades/Carbon-steel/s355nlh.html> ; 28.06.2015.
- [77]: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=654 ; 29.06.2015.